

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
ХАРЬКОВСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ ГОРОДСКОГО
ХОЗЯЙСТВА

О.Г. Гриб, А.А. Светелик, Г.А. Сендерович, Д.Н. Калюжный

**АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА
ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТ ПОВРЕЖДЕНИЯ ЛИНИЙ
ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ**

Рекомендовано Министерством образования и науки Украины как
учебное пособие для студентов электроэнергетических специальностей
высших учебных заведений

Харьков – ХГАГХ – 2003

УДК 621.315

Автоматизированные методы и средства определения мест повреждения линий электропередачи: Уч. пособие / О.Г. Гриб, А.А. Светелик, Г.А. Сендерович, Д.Н. Калюжный. Под общей редакцией О.Г. Гриба. – Харьков: ХГАГХ, 2003. -146 с.

Учебное пособие посвящено определению мест повреждения линий электропередачи.

Пособие предназначено для студентов дневной и заочной формы обучения специальности «Электротехнические системы электропотребления».

Ил.52. Табл. 9. Библиогр. 124 наим.

Рецензенты:

П.И. Савченко, д-р техн. наук, профессор (Харьковский государственный технический университет сельского хозяйства);

Л.А. Назаренко, д-р физ.-мат. наук, профессор (Харьковский государственный научно-исследовательский институт метрологии).

Гриф выдан Министерством образования и науки Украины, решение от 04.07.03 г. № 14/18.2-1178

Рекомендовано кафедрой «Электроснабжение городов», протокол №5 от 10.12.02

ISBN 966-695-047-2

© О.Г. Гриб, А.А. Светелик, Г.А. Сендерович, Д.Н. Калюжный. ХГАГХ, 2003

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ ЛИНИЙ ЛЕКТОПЕРЕДАЧИ.....	7
1.1 Топографические методы ОМП.....	7
1.2 Импульсные методы ОМП.....	10
1.3 Методы ОМП по ПАР.....	15
1.3.1 Двухсторонние методы ОМП по ПАР.....	15
1.3.2 Односторонние методы ОМП по ПАР.....	23
2 МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ОВРЕЖДЕНИЯ.....	49
2.1 Однофазное короткое замыкание.....	49
2.2 Двухфазное короткое замыкание.....	66
2.3 Трехфазное короткое замыкание.....	71
3 МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАССТОЯНИЯ ДО МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ.....	76
3.1 Расчет параметров системы С2.....	76
3.2 Расчет токов короткого замыкания от системы С2.....	80
3.3 Алгоритм определения расстояния до места овреждения.....	84
3.3.1 Блок определения места овреждения.....	88
3.3.2 Блок определения параметров системы С2.....	104
4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ.....	112
4.1 Программно-аппаратный комплекс "ЦПРС".....	112
4.2 Анализ аварийных отключений иний.	114
4.2.1 Повреждение ВЛ "Л - СиМ".....	114
4.2.2 Повреждение ВЛ "И-С".....	126
4.2.3 Повреждение ВЛ "К - Б".....	132
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	137

ВВЕДЕНИЕ

Нарушение нормального режима работы электроэнергетических систем, как правило, происходят из-за повреждения её элементов, в частности, линий электропередачи (ЛЭП). Причинами повреждений ЛЭП являются воздействия природных и технических факторов. К природным факторам относятся ветер, гололед, перепад температур, атмосферные перенапряжения, к техническим – короткие замыкания (КЗ), внутренние перенапряжения, нарушения правил технической эксплуатации и т.п.

Повреждение ЛЭП приводит к нарушению электроснабжения, снижению качества и повышению потерь электрической энергии. Принимая во внимание качественный состав потребителей электроэнергии, где компьютерные технологии занимают главное место, ущерб от недоотпуска и снижения качества электрической энергии оказывается значительным. Это объясняется тем, что компьютерная техника чувствительна к сбоям электроснабжения и низкому качеству электрической энергии, что является причиной сбоев непрерывных технологических циклов, потери информации, порчи программных продуктов и т.п. Следует также заметить, что повышение потерь электроэнергии приводит к росту затрат на транспортировку электрической энергии. С учетом ограниченного количества энерго-ресурсов эти затраты также оказываются значительными.

Для восстановления нормального режима работы электроэнергетических систем, сокращения ущерба и затрат необходимо быстро и точно определять места повреждений ЛЭП. Вопросу определения места повреждения (ОМП) посвящено большое количество работ как отечественных, так и зарубежных ученых [1-22]. Основной вклад в теорию и практику ОМП ЛЭП внесли А.И. Айзенфельд, А.С. Малый, Г.М. Шалыт, Е.А. Аржанников, А.-С.С. Саухатас, В.Н. Аронсон, Ю.А. Лямец, Стингфилд, Швейтцер, Такаджи и др.

Можно выделить две основные группы методов определения места повреждения, которые дополняют друг друга по требованиям скорости и точности ОМП. Первая группа – топографические методы, которые удовлетворяют требованию точности ОМП, но занимают значительное время, вторая группа – дистанционные методы, удовлетворяющие требованию скорости, но менее точные по сравнению с топографическими.

Топографические методы ОМП основаны на определении топографической точки места повреждения на трассе линии с помощью специальных устройств. Для реализации ОМП топографическими методами необходимо при каждом повреждении линии производить её обход вдоль трассы линии. Это требует значительного времени, что является существенным недостатком данной группы методов ОМП.

Дистанционные методы ОМП основаны на измерении расстояния до места повреждения от конца или концов поврежденной линии. Они подразделяются на импульсные методы и методы ОМП по параметрам аварийного режима (ПАР).

Импульсные методы основаны на измерении временных интервалов распространения электромагнитных волн по линиям. Для их реализации разработаны автоматические и неавтоматические измерители [23-32]. Автоматические локационные искатели повреждений обеспечивают определение места пробоя изоляции и обрыва в любых случаях. Неавтоматические искатели пригодны лишь при повреждении изоляции с переходным сопротивлением менее 1-2 кОм или обрыва проводов. Недостатком импульсных методов ОМП является снижение их эффективности при нарушении однородности линии за счет появления «паразитных» отражений импульсов.

Методы ОМП по ПАР основаны на измерениях параметров аварийного режима и в зависимости от установки измерительных устройств по концам поврежденной линии подразделяются на одно- и двухсторонние.

Двухсторонние методы ОМП по ПАР, основанные на теории многополосников, предполагают наличие полной и синхронизированной информации с двух концов линии. Для этого необходимы установка фиксирующих приборов с двух концов поврежденной линии, средства или методы синхронизации, а также наличие каналов связи.

Двухсторонние методы ОМП по ПАР являются наиболее точными. Однако они обладают рядом существенных недостатков, к которым относятся их техническая реализация, требующая значительных капитальных вложений, а также надежность, зависящая от правильной работы фиксирующих приборов с двух концов линии, средств синхронизации показаний этих приборов и каналов связи.

Одностороннее ОМП по ПАР основаны на решении уравнения петли КЗ или использовании модели линии и требуют наличия параметров аварийного режима с одного конца поврежденной линии. Для их реализации достаточно наличия одного фиксирующего прибора на одном из концов ЛЭП.

Недостатком одностороннего ОМП по ПАР является погрешность получения результатов из-за наличия методических погрешностей, обусловленных неизвестной информацией. К последней относится переходное сопротивление в месте повреждения и система с противоположного замера конца линии.

Для определения места повреждения по параметрам аварийного режима разработаны следующие устройства:

- фиксирующие приборы [33, 34, 35-62], наибольшее распространение из которых получили приборы типа ФИП, ФИП-1, ФИП-2, ЛИФП, ФПТ, ФПН и ФИС;
- цифровые программно — аппаратные комплексы на базе ЭВМ: «ЦПРС» [63], «Рекон 06БС» [64], «Регина» [65], «Нева» [66], «Парма РП 4.06», «Парма РП 4.08» [67], «Oscillostore P 531», «Oscillostore E 410» фирмы Siemens [68];
- приемный модуль релейной защиты и автоматики (ПМ РЗА) “Диамант” [69].

Наибольшее распространение получили фиксирующие приборы типа ФИП и ФИС. Так, общее количество фиксирующих приборов типа ФИП, предназначенных для двухстороннего ОМП, составляет 70% от всех установленных в энергосистеме, фиксирующих приборов для одностороннего ОМП типа ФИС – 3,3%. Новые устройства выполненные на базе ЭВМ, начинают только внедряться и их количество в энергосистеме ограничено.

Как показала эксплуатационная практика, относительное линейное отклонение расчетных расстояний до мест повреждений с использованием фиксирующих приборов составляет величину, равную 5,4% [70]. При этом двухстороннее и одностороннее ОМП используется совместно, а в ряде случаев одностороннее ОМП является основным.

Проведенный анализ методов и средств ОМП позволяет сделать следующие выводы:

- топографическое ОМП наиболее точное, но занимает значительное время;
- импульсное ОМП малоэффективно на неоднородных ЛЭП за счет появления «паразитных» отражений импульсов ;
- двухстороннее ОМП по ПАР, хоть и обладает высокой точностью, однако требует значительных капитальных вложений и имеет невысокую надежность;
- одностороннему ОМП по ПАР присуща методическая погрешность за счет наличия неизвестной информации, к которой относится переходное сопротивление в месте повреждения и система с противоположно-го конца поврежденной линии.

На сегодняшний день ОМП ЛЭП имеет высокую погрешность. Принимая во внимание качественные изменения, произошедшие в области измерительных средств, а именно переход от аналоговых устройств к цифровым, выполненным на базе ЭВМ, появляется возможность усовершенствования методов и средств ОМП. При этом актуальным является усовершенствование наиболее дешевых и надежных методов и средств одностороннего ОМП по ПАР путем уменьшения влияния неизвестной информации на точность получаемых результатов.

1 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Повреждение линий электропередачи приводит к нарушению нормального режима работы электроэнергетических систем и, как следствие, к нарушению нормального электроснабжения потребителей, снижению качества электрической энергии и повышению потерь электроэнергии в сети. Для восстановления нормального режима работы необходимо как можно быстрее восстановить поврежденную линию. Основную часть времени восстановления поврежденной линии занимает процесс определения места повреждения. Исходя из этого, решение задачи ОМП должно быть одновременно быстрым и точным.

Разнообразие видов и характера повреждений, а также структуры и условий работы электрических сетей привело к большому разнообразию методов ОМП, которые можно разделить на две большие группы – дистанционные и топографические [1]. Дистанционные методы ОМП [2-7, 71] заключаются в измерении расстояния до места повреждения от конца или концов линии. Эта группа методов, с одной стороны, удовлетворяет требованию быстроты ОМП, но с другой – обладает ограниченной точностью. Топографические методы ОМП [1] заключаются в определении места повреждения на трассе линии электропередачи, т.е. топографической точки расположения места повреждения. Данная группа методов обладает высокой точностью, но требует большого количества времени.

Для выполнения требований по скорости и точности ОМП целесообразно применение двух методов ОМП – дистанционного и топографического [1]. Сначала с помощью дистанционного метода ОМП определяют зону, в которой находится место повреждения, а затем, используя топографический метод, устанавливается точное место повреждения.

На рис.1.1 приведена классификация методов ОМП. Как видно из рис.1.1, дистанционные методы ОМП также подразделяются на две большие группы – импульсные и методы по параметрам аварийного режима.

1.1 Топографические методы ОМП

Топографические методы ОМП разделяются на индукционные и контактные. Контактные методы ОМП, в свою очередь, делятся на электромеханические, акустические и потенциальные.

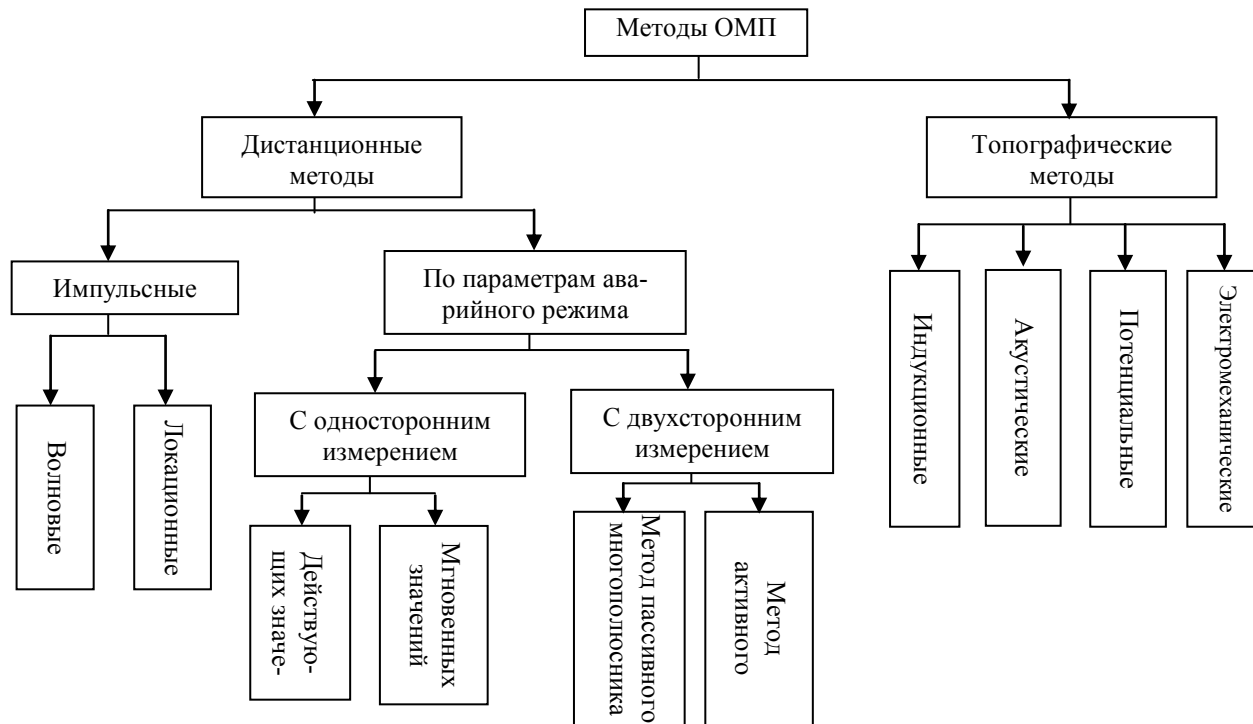


Рис. 1.1 – Классификация методов ОМП

Индукционные методы предназначены для топографического ОМП кабельных (КЛ) и воздушных (ВЛ) линий. Для КЛ, проложенных в земле, индукционные методы позволяют также уточнить трассу линии, установить глубину залегания кабеля и места расположения соединительных муфт. Сущность индукционных методов заключается в индикации параметров магнитного поля токов, протекающих по проводам (жилам) и в земле вдоль трассы линии. Изменения параметров магнитного поля вблизи места повреждения или в иных характерных точках трассы улавливаются с помощью специальных датчиков (индукционных рамок), усилителей и индикаторов при их перемещении вдоль трассы ВЛ или КЛ.

Акустические методы предназначены для ОМП кабельных линий, основаны на улавливании на трассе акустических (механических) колебаний, возникающих на поверхности грунта или асфальтобетонного покрытия при искровом разряде в изоляции кабеля. Оператор с акустическим датчиком и усилителем перемещается в зоне $\pm (15 - 40)$ м, выделенной дистанционным методом, и определяет место максимального уровня приема по индикатору или на слух с помощью телефона. Искровой разряд в месте повреждения изоляции создается посредством специальных устройств, подключаемых на конце КЛ.

Потенциальные методы предназначены для ОМП кабельных линий. Данные методы основаны на фиксации вдоль трассы электрических потенциалов, создаваемых протекающими по оболочке КЛ и в земле токами. Используются постоянный и переменный токи повышенной частоты. Оператор перемещается по трассе с двумя контактными стержнями или пластинами. В первом случае осуществляется непосредственное измерение разности потенциалов, во втором – через емкость пластин. Пластины используют при асфальтобетонных покрытиях на трассе ВЛ. В переносное устройство входят усилитель и индикатор. Ток в поврежденную жилу подается с конца КЛ.

Электромеханические методы предназначены для воздушных линий. Эти методы основаны на фиксации механических усилий, создаваемых за счет энергии тока короткого замыкания (КЗ). Могут использоваться электродинамические усилия между током в токоведущих частях и наводимым током в расположенном вблизи датчике и электромагнитные силы, приложенные к якорю из магнитного материала. Электромеханические устройства (указатели) устанавливают стационарно в распределительных устройствах и на опорах ВЛ. Протекание тока КЗ через контролируемый объект сигнализируется с помощью блинкера. Восстановление исходного состояния указателя (возврат

блинкера) в ряде конструкций осуществляется автоматически при включении ВЛ под напряжение.

1.2 Импульсные методы ОМП

Импульсные методы ОМП [6] основаны на измерении временных интервалов при распространении электромагнитных волн по линии электропередачи [72-82]. Применяются как на КЛ, так и на ВЛ. По признаку использования для отсчета времени специально генерируемых импульсов или же возникающих в месте повреждения линии электромагнитных волн импульсные методы делятся на локационные и волновые (рис.1.1).

Локационный метод [83] основан на измерении времени между моментом посылки в линию зондирующего электрического импульса, и моментом прихода к началу линии импульса, отраженного от места повреждения. Трасса распространения импульсов в поврежденной линии и временные соотношения показаны на рис.1.2. Послав в линию импульс, замеряют интервал t_l – время двойного пробега этого импульса до места повреждения. Искомое расстояние до места повреждения определяется как

$$l = \frac{t_l}{2} v, \quad (1.1)$$

где v – скорость распространения импульса в линии.

Локационные измерения подразделяются на автоматические и неавтоматические. Первые используются для воздушных линий (ВЛ), включенных в находящуюся под рабочим напряжением электрическую сеть. При срабатывании релейной защиты запускается автоматический локационный искатель, который фиксирует искомое расстояние за время, меньшее одной десятой доли секунды.

Измерения в период горения дуги короткого замыкания (КЗ) – важное условие ОМП на ВЛ. После погасания дуги на поврежденной ВЛ получить необходимый отраженный импульс при неавтоматической локации в большинстве случаев не удастся.

Волновой метод. Этот метод разделяется на методы односторонних и двухсторонних измерений.

Волновой метод двухсторонних измерений [83] основан на измерении времени между моментами достижения концов линии фронтами электромагнитных волн, возникающих в месте повреждения.

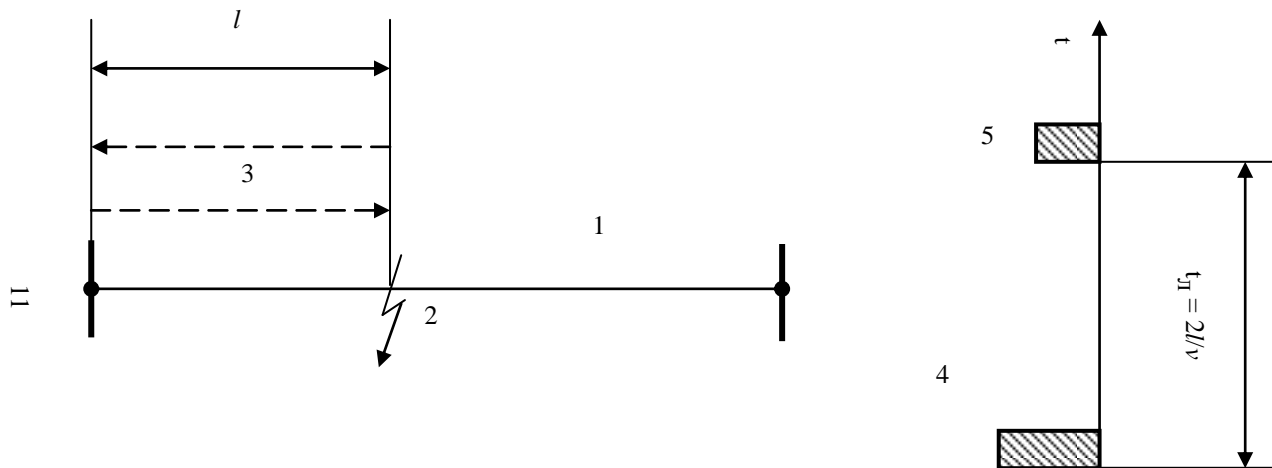


Рис.1.2 – Трасса распространения импульсов и временные соотношения при локационном методе ОМП:
 1 – линия; 2 – место повреждения; 3 – трасса распространения импульсов; 4,5 – зондирующий и отраженный импульсы

На рис.1.3,а показан один провод линий электропередачи длиной L , который в момент повреждения $t = 0$ заряжен до напряжения U , например, положительной полярности. При возникновении пробоя изоляции этого провода на землю в некоторой точке, удаленной от конца линии на расстояние L_1 , напряжение в этой точке становится равным нулю. Вследствие этого в месте повреждения возникают распространяющиеся в обе стороны электромагнитные волны напряжением U , стремящиеся со скоростью v распространить нулевой потенциал по всей линии (рис.1.3,б).

По истечении времени $t_1 = (L-L_1)/v$ фронт одной из волн достигает ближнего (левого на рис.1.3, в) конца линии, спустя интервал $t_2 = L_1/v$, фронт второй волны достигает дальнего конца. Временные соотношения показаны на рис.1.3,г. Интервал времени

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{2l'}{v} - \frac{L}{v}. \quad (1.2)$$

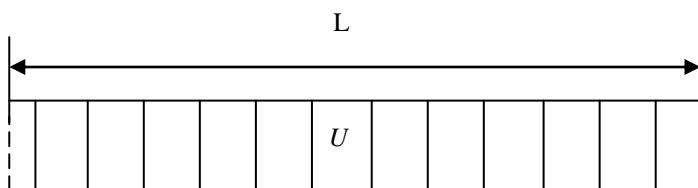
Учитывая, что длина линии L известна, из выражения (1.2) можно определить расстояние до места повреждения:

$$l' = \frac{L}{2} + \frac{\Delta t}{2} v. \quad (1.3)$$

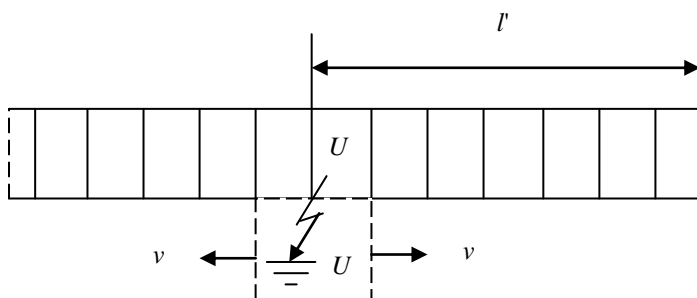
Волновой метод односторонних измерений используется как на включенных, так и на отключенных линиях [83, 84]. Он предполагает измерение времени между моментом прихода к началу линии фронта волны, возникшей в месте повреждения, т.е. на расстоянии l от начала линии, и моментом вторичного прихода фронта волны после двух отражений (в начале линии и месте повреждения). Указанный интервал определяется как $\tau = 2l/v$, откуда искомое расстояние находим как

$$l = \frac{\tau}{2} v. \quad (1.4)$$

Для отключенных линий этот метод называется методом колебательного разряда.



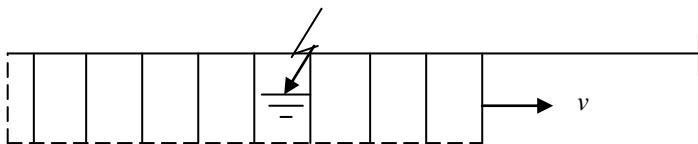
a)



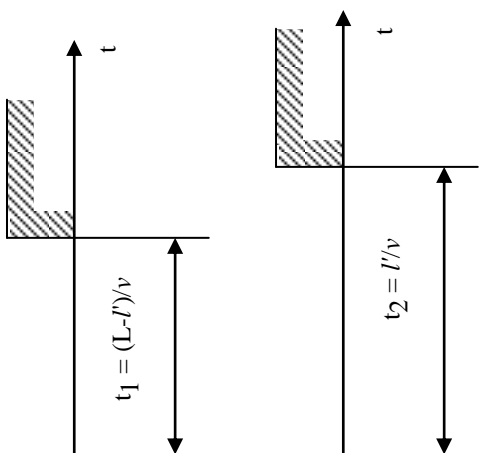
б)

Рис.1.3 – Диаграмма распространения волн и временные соотношения при волновом методе ОМП:

а — напряжение на линии перед повреждением; б — распространение волн непосредственно после пробоя; в — расположение фронтов волн в момент достижения одним из них конца линии; г — временные соотношения.



6)



2)

На основе импульсных методов ОМП разработан ряд автоматических искателей [23-32]. Основным недостатком этих устройств является недостаточная эффективность определения места повреждения на ВЛ с ответвлениями. Это следует из того, что электрические импульсы при распространении вдоль линии преломляются и отражаются не только в местах повреждения, но и в местах нарушения однородности самой линии [6]. К таким местам неоднородности, в частности, относятся и ответвления от ВЛ к понизительным подстанциям, где появляются отраженные и преломленные импульсы как от места включения ответвления, так и от его конца.

Основная трудность в дистанционном ОМП линий импульсными методами заключается в появлении дополнительного существенно-го затухания и многократного отражения электрических импульсов. Указанных недостатков лишены дистанционные методы ОМП по ПАР.

1.3 Методы ОМП по ПАР

Методы ОМП по ПАР основаны на измерении параметров аварийного режима [85] и используются для ВЛ. Под параметрами аварийного режима понимают составляющие или комбинации токов и напряжений промышленной частоты в аварийном режиме, по которым можно вычислить расстояние до места КЗ.

В зависимости от расположения измерительных средств по концам ВЛ (на одном конце линии либо на двух концах) эти методы делятся на одно- и двухсторонние (рис.1.1).

1.3.1 Двухсторонние методы ОМП по ПАР

Двухсторонние методы ОМП по ПАР основаны на теории многополюсников [86] с использованием алгебры матриц [87]. Исходя из этого, различают методы пассивного и активного многополюсников двухстороннего ОМП (рис.1.1).

Метод пассивного многополюсника двухстороннего ОМП. Данный метод основан на представлении поврежденной линии в виде пассивного многополюсника.

Рассмотрим однородную p – проводную несимметричную линию длиной L , имеющей в точке, удаленной от начала на расстояние l , повреждение, представленное в виде подключения произвольной попе-

речной матрицы \underline{Y}_n (рис.1.4). Схему замещения такой линии можно представить двумя пассивными $2(p+1)$ полюсниками, расположенными слева и справа от места повреждения (рис1.5).

Соотношения токов и напряжений на входе и выходе пассивного $2(p+1)$ полюсника определяются общими матричными уравнениями пассивного $2(p+1)$ полюсника:

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_I \\ \underline{I}_I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{A}_{aa} & \underline{A}_{ab} \\ \underline{A}_{ba} & \underline{A}_{bb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U}_{II} \\ \underline{I}_{II} \end{bmatrix}, \quad (1.5)$$

где $\underline{U}_I = \begin{bmatrix} \underline{U}_1 \\ \dots \\ \underline{U}_p \end{bmatrix}$; $\underline{I}_I = \begin{bmatrix} \underline{I}_1 \\ \dots \\ \underline{I}_p \end{bmatrix}$ – столбцевые матрицы векторов напряжений

и токов, относящихся к первой группе полюсов;

$\underline{U}_{II} = \begin{bmatrix} \underline{U}_{p+1} \\ \dots \\ \underline{U}_{2p} \end{bmatrix}$; $\underline{I}_{II} = \begin{bmatrix} \underline{I}_{p+1} \\ \dots \\ \underline{I}_{2p} \end{bmatrix}$ – столбцевые матрицы векторов

напряжений и токов, относящихся к первой группе полюсов;

$$\underline{A}_{aa} = \begin{bmatrix} \underline{A}_{1,1} & \dots & \underline{A}_{1,p} \\ \underline{A}_{p,1} & \dots & \underline{A}_{p,p} \end{bmatrix}; \underline{A}_{ab} = \begin{bmatrix} \underline{A}_{1,p+1} & \dots & \underline{A}_{1,2p} \\ \underline{A}_{p,p+1} & \dots & \underline{A}_{p,2p} \end{bmatrix};$$

$$\underline{A}_{ba} = \begin{bmatrix} \underline{A}_{p+1,1} & \dots & \underline{A}_{p+1,p} \\ \underline{A}_{2p,1} & \dots & \underline{A}_{2p,p} \end{bmatrix}; \underline{A}_{bb} = \begin{bmatrix} \underline{A}_{p+1,p+1} & \dots & \underline{A}_{p+1,2p} \\ \underline{A}_{2p,p+1} & \dots & \underline{A}_{2p,2p} \end{bmatrix} -$$

квадратные матрицы пассивных параметров, постоянные для данного $2(p+1)$ полюсника и зависящие от его конфигурации.

Из (1.5) можно получить адекватные системы матричных уравнений с различными соотношениями между входными и выходными величинами токов и напряжений:

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_I &= \underline{A}_{aa} \underline{U}_{II} + \underline{A}_{ab} \underline{I}_{II} \\ \underline{I}_I &= \underline{A}_{ba} \underline{U}_{II} + \underline{A}_{bb} \underline{I}_{II} \end{aligned} \right\}; \quad (1.6)$$

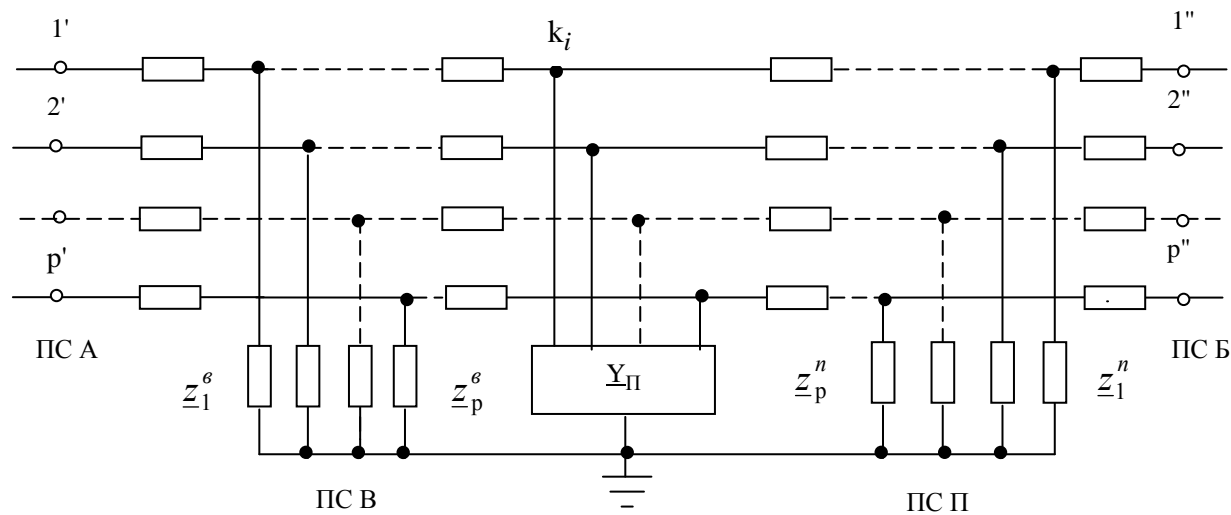


Рис. 1.4 – Однородная p – проводная несимметричная линия

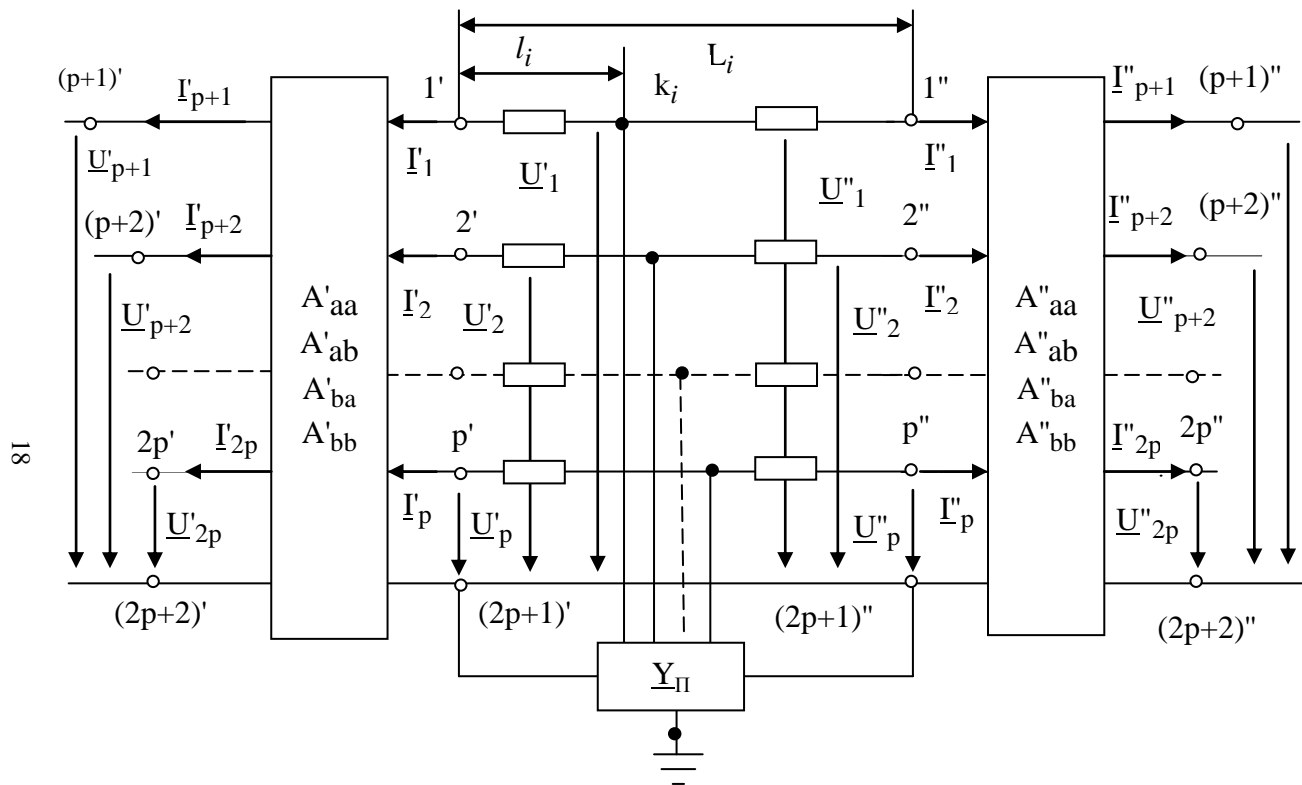


Рис.1.5 – Схема замещения однородной p -проводной линии в виде двух пассивных $2(p+1)$ полюсников

$$\left. \begin{aligned} \underline{I}_I &= \underline{Y}_{aa} \underline{U}_I + \underline{Y}_{ab} \underline{U}_{II} \\ \underline{I}_{II} &= \underline{Y}_{ba} \underline{U}_I + \underline{Y}_{bb} \underline{U}_{II} \end{aligned} \right\}; \quad (1.7)$$

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_I &= \underline{Z}_{aa} \underline{I}_I + \underline{Z}_{ab} \underline{I}_{II} \\ \underline{U}_{II} &= \underline{Z}_{ba} \underline{I}_I + \underline{Z}_{bb} \underline{I}_{II} \end{aligned} \right\}, \quad (1.8)$$

где \underline{Z} и \underline{Y} – матрицы параметров, зависящие от пассивных параметров $2(p+1)$ полюсника.

Пассивные параметры $2(p+1)$ полюсника определяются из так называемого способа короткого замыкания и холостого хода [86].

При КЗ на i -м участке линии для точки повреждения "к" (рис.1.5) запишем следующие матричные уравнения:

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_{ki} &= \underline{U}_I' + l_i \underline{Z}_{уд} \underline{I}_I' \\ \underline{U}_{ki} &= \underline{U}_I'' + (L_i - l_i) \underline{Z}_{уд} \underline{I}_I'' \end{aligned} \right\}, \quad (1.9)$$

где \underline{U}_{ki} – напряжение в точке повреждения; \underline{U}_I' , \underline{U}_I'' – напряжения первой группы полюсов соответственно левого и правого $2(p+1)$ многополюсника (рис.1.5); L_i – длина i -го участка линии, l_i – расстояние от начала i -того участка линии до места повреждения; $\underline{Z}_{уд}$ – матрица удельных полных комплексных сопротивлений симметричной линии, состоящая из расположенных по главной диагонали одинаковых собственных удельных сопротивлений \underline{Z}_c и остальных одинаковых элементов – взаимных удельных сопротивлений $\underline{Z}_{вз}$:

$$\underline{Z}_{уд} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_c & \underline{Z}_{вз} & \cdots & \underline{Z}_{вз} \\ \underline{Z}_{вз} & \underline{Z}_c & \cdots & \underline{Z}_{вз} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \underline{Z}_{вз} & \underline{Z}_{вз} & \cdots & \underline{Z}_c \end{bmatrix}. \quad (1.10)$$

Исключая величину \underline{U}_{ki} из выражения (1.9), получим соотношение

$$\underline{U}_{ki} = \underline{U}_I' + l_i \underline{Z}_{yd} \underline{I}_I' = \underline{U}_I'' + (\underline{L}_i - l_i) \underline{Z}_{yd} \underline{I}_I'' . \quad (1.11)$$

Воспользовавшись системой матричных уравнений (1.6), выражение (1.11) примет следующий вид:

$$\begin{aligned} l_i \underline{Z}_{yd} (\underline{A}'_{ba} \underline{U}_I'' + \underline{A}'_{bb} \underline{I}_{II}' + \underline{A}''_{ba} \underline{U}_{II}'' + \underline{A}''_{bb} \underline{I}_{II}'') = \\ = \underline{A}''_{aa} \underline{U}_{II}'' + \underline{A}''_{ab} \underline{I}_{II}'' - \underline{A}'_{aa} \underline{U}_{II}' - \underline{A}'_{ab} \underline{I}_{II}' + L_i \underline{Z}_{yd} (\underline{A}''_{ba} \underline{U}_{II}'' + \underline{A}''_{bb} \underline{I}_{II}'') \end{aligned} \quad (1.12)$$

где – символы “ I ” и “ II ” означают соответственно принадлежность к первой и второй группе полюсов $2(p+1)$ полюсника, а “ ' ” и “ ” – принадлежность к левому и правому $2(p+1)$ полюсникам.

Полученное матричное уравнение (1.12) можно заменить p скалярными уравнениями. Искомое расстояние l_i до места повреждения в общем случае может быть определено из любого скалярного уравнения. Однако в случае, когда имеем повреждение некоторых проводов линии, для отыскания расстояния до места повреждения можно воспользоваться только уравнениями для строк, относящихся к поврежденной линии.

Метод активного многополюсника двухстороннего ОМП.

Данный метод основан на представлении поврежденной линии в виде активного многополюсника, внутри которого действует задающее напряжение \underline{E}_K , равное напряжению в месте повреждения.

Рассмотрим повреждение p – проводной несимметричной линии (рис.1.4). Схема замещения такой линии в виде активного $2(p+1)$ полюсника представлена на рис.1.6.

Для рассматриваемого многополюсника справедливы следующие матричные уравнения:

$$\left. \begin{aligned} \underline{J}_I &= \underline{I}_I - \underline{Y}_{aa} \underline{U}_I - \underline{Y}_{ab} \underline{U}_{II} \\ \underline{J}_{II} &= \underline{I}_{II} - \underline{Y}_{ba} \underline{U}_I - \underline{Y}_{bb} \underline{U}_{II} \end{aligned} \right\} , \quad (1.13)$$

$$\left. \begin{aligned} \underline{e}_I &= \underline{U}_I - \underline{Z}_{aa} \underline{I}_I - \underline{Z}_{ab} \underline{I}_{II} \\ \underline{e}_{II} &= \underline{U}_{II} - \underline{Z}_{ba} \underline{I}_I - \underline{Z}_{bb} \underline{I}_{II} \end{aligned} \right\} , \quad (1.14)$$

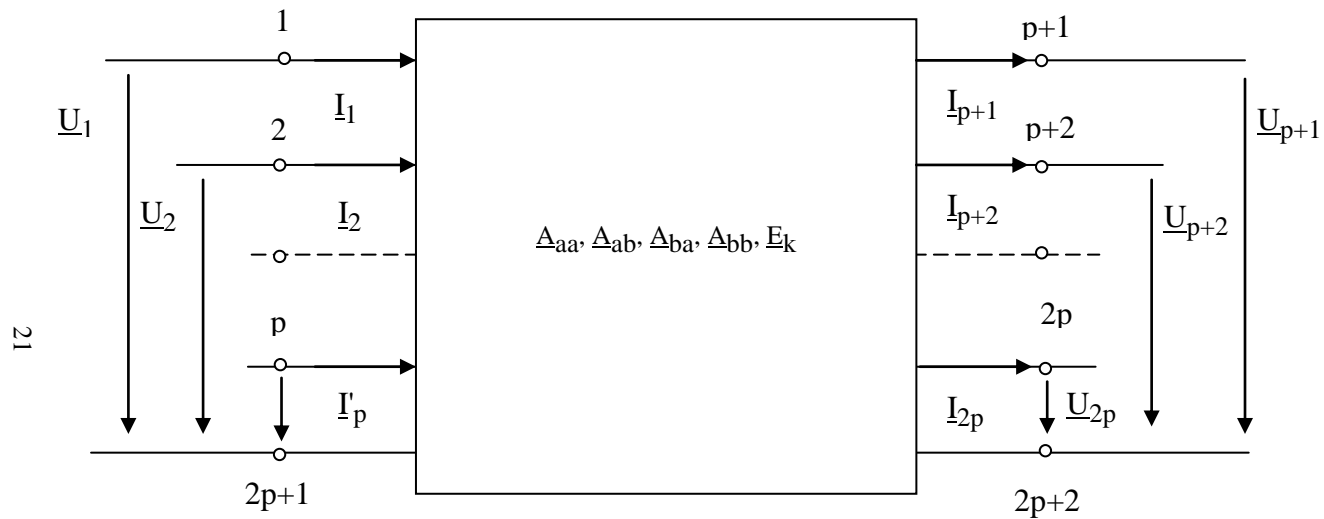


Рис.1.6 – Схема замещения однородной p -проводной линии в виде активного $2(p+1)$ полюсника

где $\underline{J}_I = \begin{bmatrix} \underline{J}_1 \\ \dots \\ \underline{J}_P \end{bmatrix}$; $\underline{e}_I = \begin{bmatrix} \underline{e}_1 \\ \dots \\ \underline{e}_P \end{bmatrix}$; $\underline{J}_{II} = \begin{bmatrix} \underline{J}_{P+1} \\ \dots \\ \underline{J}_{2P} \end{bmatrix}$; $\underline{e}_{II} = \begin{bmatrix} \underline{e}_{P+1} \\ \dots \\ \underline{e}_{2P} \end{bmatrix}$ – столбцовые мат-

рицы векторов задающих токов и напряжений, относящихся соответственно к первой и второй группам полюсов;

Матрицы токов \underline{J} и напряжений \underline{e} относятся к автономным параметрам $2(p+1)$ полюсника и зависят от задающего напряжения \underline{E}_K .

В правой части уравнений (1.13) и (1.14) приведены пассивные параметры $2(p+1)$ полюсника и параметры аварийного режима, а в левой – автономные параметры \underline{J} и \underline{e} , которые для каждой группы полюсов соответствуют при данном значении задающего напряжения \underline{E}_K определенному месту повреждения. Следовательно, и отношение автономных параметров для каждой группы полюсов также будет соответствовать тому же месту повреждения. Для одной и той же точки КЗ отношение автономных параметров при всех значениях задающего напряжения \underline{E}_K также остается постоянным. Отсюда следует важный вывод, что отношение автономных параметров является функцией расстояния от каждой подстанции до места повреждения.

В общем случае расстояние l_j до места повреждения может быть определено из любого скалярного уравнения, соответствующего j -той строке матричных уравнений (1.13) и (1.14). Поскольку точность расчета расстояния зависит от производной изменения автономных параметров (токов и напряжений) при перемещении точки повреждения вдоль линии, она будет различна при использовании каждого уравнения. Наибольшая точность получается для строк уравнений, соответствующих поврежденным проводам. Так, при повреждении j -того провода получаем:

$$\underline{k}_e = \frac{\underline{e}_{I\pi,\pi}}{\underline{e}_{II\pi,\pi}} = \frac{\underline{U}_j - \underline{Z}_{j,1} \underline{I}_1 - \dots - \underline{Z}_{j,2P} \underline{I}_{2P}}{\underline{U}_{P+j} - \underline{Z}_{P+j,1} \underline{I}_1 - \dots - \underline{Z}_{P+j,2P} \underline{I}_{2P}} = f_1(l); \quad (1.15)$$

$$\underline{k}_J = \frac{\underline{J}_{I\pi,\pi}}{\underline{J}_{II\pi,\pi}} = \frac{\underline{I}_j - \underline{Y}_{j,1} \underline{U}_1 - \dots - \underline{Y}_{j,2P} \underline{U}_{2P}}{\underline{I}_{P+j} - \underline{Y}_{P+j,1} \underline{U}_1 - \dots - \underline{Y}_{P+j,2P} \underline{U}_{2P}} = f_2(l), \quad (1.16)$$

где $\underline{e}_{\Pi,п}$ и $\underline{e}_{Ш,п}$ – автономные параметры (задающие напряжения) поврежденного провода соответственно со стороны первой и второй групп полюсов;

$\underline{I}_{\Pi,п}$ и $\underline{I}_{Ш,п}$ – автономные параметры (задающие токи) поврежденного провода соответствующие первой и второй группам полюсов.

С помощью выражения (1.15) или (1.16) можно определить место повреждения на любом проводе p проводной линии. Вычисленные расстояния будут равны друг другу, так как они соответствуют одному месту повреждения. Одновременное использование обеих выражений повышает достоверность расчета [88].

Двухсторонние методы ОМП по ПАР являются наиболее точными. Однако существенным недостатком рассмотренных способов двухстороннего ОМП является их реализация, которая требует установки фиксирующих устройств по концам линии, средств и методов синхронизации показаний этих приборов, а также наличия каналов связи, что приводит к увеличению капитальных затрат. При отказе приборов, а также неправильной работе на одном из концов линии или при повреждении канала связи эти способы оказываются бесполезными. Это подтверждает эксплуатационная практика фиксирующих приборов ФИП, для которых за 1990 г. зарегистрировано 1151 отказов в работе [70] при их наличии в энергосистемах порядка 20 тыс. шт.

1.3.2 Односторонние методы ОМП по ПАР

Односторонние методы ОМП по сравнению с двухсторонними позволяют получать результаты определения расстояния до места повреждения без передачи информации с другого конца линии. Это является существенным преимуществом односторонних методов ОМП. Однако эти методы получили меньшее внедрение по сравнению с двухсторонними методами в связи с большей погрешностью ОМП. Эта погрешность обусловлена следующими факторами: наличием переходного сопротивления в месте повреждения; на линиях с двухсторонним питанием, участием в КЗ системы с противоположного забору конца линии; на линиях с ответвлениями, при КЗ за ответвлением, влиянием токов ответвления [5].

Односторонние методы ОМП по способу использования параметров электрических величин (токов, напряжений) для решения задачи ОМП подразделяются на методы, использующие действующие (ин-

тегральных) и мгновенные значения параметров аварийного режима (рис.1.1), т. е. в первом случае для определения места повреждения производятся операции над действующими значениями ПАР, а во втором – над мгновенными. Причем действующие значения параметров аварийного режима получаются путем интегрирования параметров мгновенных значений того же аварийного режима.

Методы одностороннего ОМП, использующие действующие значения. Определение места повреждения по кривым спада тока нулевой последовательности. Данный способ основан на сопоставлении измеренного тока или напряжения нулевой последовательности во время повреждения с графиком спада того же тока или напряжения, рассчитанного для однофазных и двухфазных КЗ вдоль линии через наиболее вероятные значения переходных сопротивлений с учетом характерных режимов работы, которые заранее могут быть учтены [5, 7, 89].

Точность этого способа зависит от переходного сопротивления. Переходное сопротивление, в свою очередь, зависит от типа линий и характера повреждения. На линиях с металлическими и железобетонными опорами большая часть замыканий происходит на тело опоры или грозозащитный трос. В этих случаях величина переходного сопротивления в основном определяется сопротивлением контура заземления одной опоры или нескольких опор, объединенных грозозащитным тросом, и обычно не превышает 10 – 20 Ом. Однако имеют место повреждения, при которых величина переходного сопротивления в месте повреждения колеблется от нескольких десятков до нескольких сотен Ом (вследствие проезда по линии высоких механизмов, перекрытий с провода на дерево и т.п.). Невозможность отличить замыкания на заземляющие контуры опор от непосредственного замыкания на землю приводит к тому, что вероятность совпадения действительного расстояния до места повреждения составляет примерно 90%. Кроме этого данный способ неприемлем для удаленных КЗ на длинных линиях, где крутизна спада тока становится незначительной.

Определение места однофазного короткого замыкания по отношениям токов или напряжений нулевой и обратной последовательностей. Способ основан на том, что токи нулевой и обратной последовательностей в месте повреждения при однофазном КЗ равны ($I_{K0} = I_{K2}$), но при этом по-разному распределяются в схемах нулевой и обратной последовательности [90].

Рассмотрим схемы замещения нулевой и обратной последовательностей одноцепной ВЛ при однофазном КЗ, изображенные на

рис.1.7. ВЛ и примыкающие к ней энергосистемы представлены реактивными сопротивлениями.

Токи нулевой и обратной последовательностей ($I_{K0} = I_{K2} = I_K$) распределяются между подстанциями А и В обратно пропорционально сопротивлениям плеч соответствующих схем замещения:

$$\left. \begin{aligned} I'_0 &= I_K \cdot \frac{(1-n) \cdot X_{J0} + X''_{C0}}{X_{T0}} \\ I'_2 &= I_K \cdot \frac{(1-n) \cdot X_{J2} + X''_{C2}}{X_{T2}} \end{aligned} \right\}, \quad (1.17)$$

где $n = l/L$ – отношение расстояния до места повреждения к длине линии;

$X_{J0} = x_{yд0} \cdot L$ и $X_{J2} = x_{yд2} \cdot L$ – сопротивления нулевой и обратной последовательностей линии;

$X_{T0} = X_{J0} + X'_{C0} + X''_{C0}$ – суммарное сопротивление нулевой последовательности состоящее из сопротивлений линии и систем с двух концов линии;

$X_{T2} = X_{J2} + X'_{C2} + X''_{C2}$ – суммарное сопротивление обратной последовательности.

Обозначив $\varepsilon = \frac{I'_0}{I'_2} = \frac{U'_{0C2} \cdot X'_{C2}}{U'_{2C2} \cdot X'_{C0}}$ из выражения (1.17), получаем

$$l = \left[1 - \frac{X_{T2} \cdot X''_{C0} - \varepsilon \cdot X_{T0} \cdot X''_{C2}}{\varepsilon \cdot X_{T0} \cdot X_{J2} - X_{J0} \cdot X_{T2}} \right] \cdot L. \quad (1.18)$$

Из выражения (1.18) видно, что расстояние до места повреждения при однофазном КЗ однозначно определяется по соотношению I'_0/I'_2 или U'_0/U'_2 независимо от величины переходного сопротивления $R_{п}$.

Анализ погрешности данного способа показывает, что его эффективность снижается как на коротких линиях, присоединенных на противоположном со стороны измерения конце к маломощным системам, для которых $X''_{C2}/X_{J2} > 10$, так и на длинных линиях, присоединенных на противоположном конце к мощным системам, для которых $X''_{C2}/X_{J2} < 0,25$, причем на коротких линиях погрешность

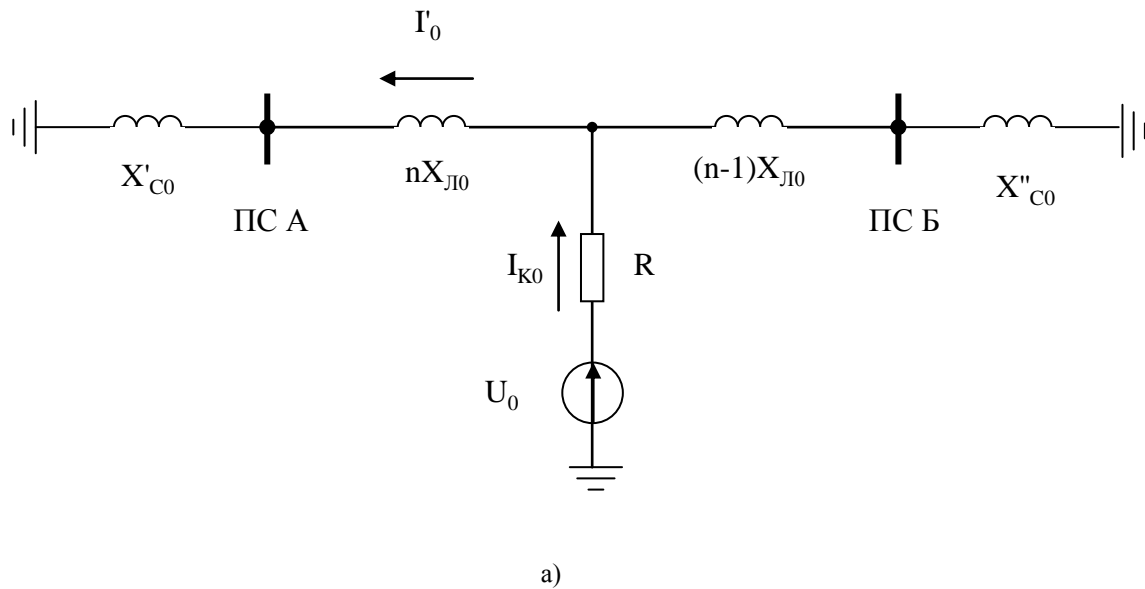
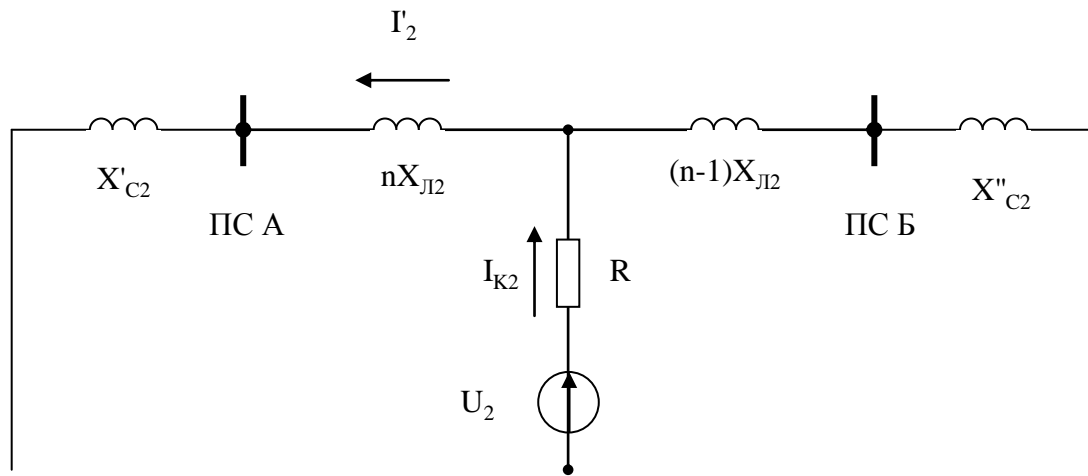


Рис. 1.7 – Схема замещения одноцепной линии при однофазном КЗ:
а – нулевой последовательности; б – обратной последовательности



б)

увеличивается при замыканиях во всех точках, на длинных же линиях наблюдается резкий рост погрешностей при замыканиях в начале линии и снижении в конце.

Существенным недостатком способа I'_0/I'_2 или U'_0/U'_2 является то, что в расчетных формулах необходимо использовать величины сопротивлений X''_{C2} и X''_{C0} системы, примыкающей к противоположному концу линии.

В условиях эксплуатации особенно затруднено точное определение сопротивления X''_{C2} , которое в отличие от X''_{C0} зависит от нагрузки системы и числа работающих генераторов. В связи с этим область применения этого способа ограничивается линиями, у которых сопротивления X''_{C2} сравнительно стабильные или имеют ограниченное число значений.

Способы ОМП, основанные на определении сопротивления петли короткого замыкания. Данная группа способов основана на решении уравнения петли короткого замыкания относительно расстояния до места повреждения.

Для решения задачи ОМП при составлении уравнения петли короткого замыкания необходимо учитывать переходное сопротивление в месте повреждения, расхождение ЭДС генераторов по фазе, наличие на отдельных участках сети нагрузок или источников электроэнергии.

Разными учеными рассмотрены различные способы решения уравнения петли короткого замыкания. Одни это делают графически, другие аналитически.

Графическое решение уравнения петли короткого замыкания [5, 91]. Рассмотрим одиночную линию с однофазным коротким замыканием через переходное сопротивление, представленную на рис.1.8. Уравнение, составленное по петле короткого замыкания для поврежденной фазы имеет вид

$$\underline{U}'_A = \underline{I}'_A \cdot \underline{Z}_A \cdot l + \left(\underline{I}'_A + \underline{I}''_A \right) \cdot R_{\pi}, \quad (1.19)$$

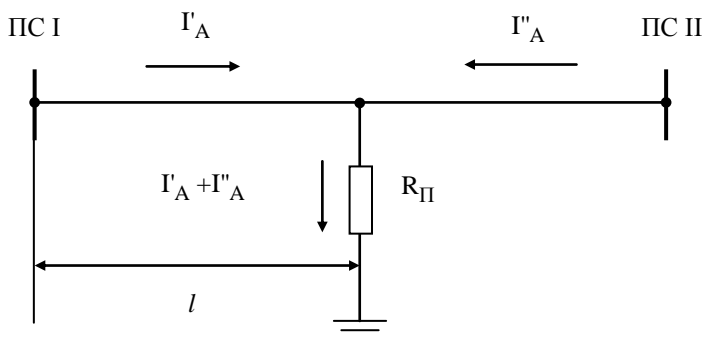


Рис. 1.8 – Схема одиночной линии с однофазным коротким замыканием через переходное сопротивление,

где \underline{U}'_A – напряжение поврежденной фазы в месте замера со стороны ПС I;

\underline{I}'_A и \underline{I}''_A – соответственно токи поврежденной фазы в месте замера со стороны ПС I и со стороны ПС II;

\underline{Z}_A – удельное сопротивление поврежденной фазы;

l – расстояние до места повреждения;

R_{Π} – переходное сопротивление в месте повреждения.

Уравнение (1.19) имеет три неизвестные величины – расстояние до места повреждения, переходное сопротивление и ток поврежденной фазы со стороны ПС II. В силу того, что токи \underline{I}'_A и \underline{I}''_A близки по фазам, выражение (1.20) можно записать в следующем виде:

$$\underline{U}'_A = \underline{U}_Z \cdot l + \underline{I}'_A \cdot R_{\Sigma}, \quad (1.20)$$

где \underline{U}_Z – удельное падение напряжение равно $\underline{I}'_A \cdot \underline{Z}_{Aуд}$ и введенное для упрощения записи;

R_{Σ} – эквивалентное сопротивление в месте повреждения, опреде-

ляемое как $\left(1 + \frac{I''_A}{I'_A}\right) \cdot R_{\Pi}$.

Решение уравнения (1.20) выполнено графически на основе векторной диаграммы, изображенной на рис.1.9, следующим образом. Направление вектора падения напряжения на сопротивлении R_3 определяется прямой, проведенной из точки А параллельно вектору тока \underline{I}'_A . Точка М пересечения этой прямой с продолжением вектора \underline{U}_Z определяет величину векторов $\underline{I}'_A \cdot R_3$ и \underline{U}_Z , удовлетворяющих уравнение (1.20). Из рассматриваемой векторной диаграммы нетрудно получить выражение для определения искомого расстояния до места повреждения l :

$$l = \frac{|\underline{U}'_\Phi|}{|\underline{U}_Z| \cdot (\cos \nu + \sin \nu \cdot \operatorname{ctg} \varphi)} = \frac{|\underline{U}'_\Phi| \cdot \sin \varphi}{|\underline{U}_Z| \cdot \sin(\varphi + \nu)}, \quad (1.21)$$

где ν – угол между векторами \underline{U}'_Φ (напряжение поврежденной фазы) и \underline{U}_Z ;

φ – угол между напряжением и током в поврежденной фазе.

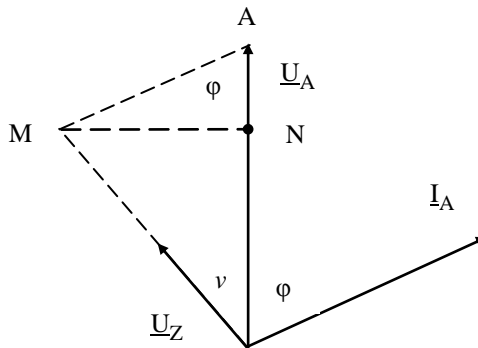


Рис. 1.9 – Векторная диаграмма тока и напряжения поврежденной фазы при однофазном КЗ через переходное сопротивление

Этот способ решения уравнения составленного по петле короткого замыкания содержит методическую погрешность, обусловленную допущением равенства аргументов токов поврежденной фазы с двух

сторон линии для исключения переходного сопротивления.

Аналитическое решение уравнения петли короткого замыкания [92]. Уравнение, составленное по петле короткого замыкания, для случая изображенного на рис.1.7, имеет следующий вид:

$$\underline{U}_{\Phi} = \underline{Z}_{1K} \cdot (\underline{I}'_{\Phi} + k \cdot \underline{I}'_0) + 3 \cdot R_{\Pi} \cdot \underline{I}_{0K}, \quad (1.22)$$

где \underline{Z}_{1K} – сопротивление прямой последовательности линии электропередачи до места КЗ;

k – коэффициент компенсации тока нулевой последовательности, определяемый как $\frac{\underline{Z}_{0K} - \underline{Z}_{1K}}{\underline{Z}_{1K}}$, где \underline{Z}_{0K} – сопротивление нулевой последовательности;

\underline{I}'_0 – ток нулевой последовательности со стороны замера (ПС I);

\underline{I}_{0K} – ток нулевой последовательности, протекающий через переходное сопротивление в месте повреждения.

Разделив левые и правые части уравнения (1.22) на величину \underline{I}'_0 , получим следующее выражение:

$$\frac{\underline{U}_{\Phi}}{\underline{I}'_0} = \frac{\underline{Z}_{1K} \cdot (\underline{I}'_{\Phi} + k \cdot \underline{I}'_0)}{\underline{I}'_0} + 3 \cdot R_{\Pi} \cdot \frac{\underline{I}_{0K}}{\underline{I}'_0}. \quad (1.23)$$

При допущении, что токи \underline{I}'_0 и \underline{I}_{0K} близки по фазе, мнимую часть уравнения (1.23) можно записать как

$$\text{Im} \left(\frac{\underline{U}_{\Phi}}{\underline{I}'_0} \right) = \text{Im} \left(\frac{\underline{Z}_{1K} \cdot (\underline{I}'_{\Phi} + k \cdot \underline{I}'_0)}{\underline{I}'_0} \right), \quad (1.24)$$

из которого сопротивление до места повреждения определяется следующим выражением:

$$|\underline{Z}_{1K}| = \frac{\text{Im}(\underline{U}_{\Phi} / \underline{I}'_0)}{\text{Im}[(\underline{I}'_{\Phi} + k \cdot \underline{I}'_0) / \underline{I}'_0]}. \quad (1.25)$$

Используя данный подход при решении уравнения (1.22) с целью повышения точности ОМП получили следующие результаты:

1. Для повышения точности определения расстояния до места повреждения при однофазных коротких замыканиях на линиях с ответвлениями [93] получено выражение

$$Z_{\text{кз}} = \frac{\text{Im}\left(\frac{U_{\Phi}}{\underline{k} \cdot \underline{I}_0}\right) - \text{Im}\left[\frac{\underline{Z}_1 \cdot (\underline{I}_{\Phi} + \underline{k} \cdot \underline{I}_0)}{\underline{k} \cdot \underline{I}_0}\right]}{\text{Im}\left[\frac{(\underline{I}_{\Phi} + \underline{k}' \cdot \underline{I}_0)}{\underline{I}_0} \cdot \underline{P}\right]}, \quad (1.26)$$

где $Z_{\text{кз}}$ – сопротивление до места повреждения;

\underline{Z}_1 – сопротивление участка линии до ответвления;

$\underline{k}' = \underline{k} + \underline{\alpha} + \underline{k} \cdot \underline{\alpha} = \underline{k} + \frac{\underline{Z}_C + \underline{Z}_1}{\underline{Z}_T} \cdot (\underline{k} + 1)$, где \underline{k} – коэффициент компенсации;

\underline{Z}_C – сопротивление нулевой последовательности питающей системы; \underline{Z}_T – сопротивление нулевой последовательности трансформатора ответвления;

\underline{P} – комплексный коэффициент, определяемый как $\underline{P} = \cos \varphi_{\text{л}} + j \sin \varphi_{\text{л}}$, где $\varphi_{\text{л}}$ – угол сопротивления линии.

2. Для повышения точности ОМП линий электропередачи, имеющих электромагнитную связь между собой при однофазных КЗ [94], получено следующее выражение:

$$l = \frac{\text{Im}\left[\frac{U_{\Phi}}{\underline{I}_{02}}\right]}{\text{Im}\left[\frac{\underline{Z}_{1y\partial} \cdot (\underline{I}_{\Phi} + \underline{k} \cdot \underline{I}_{01})}{\underline{I}_{01}}\right]} \pm \frac{\text{Im}\left[\frac{\underline{Z}_{12y\partial} \cdot \underline{I}_{02}}{\underline{I}_{01}}\right]}{\text{Im}\left[\frac{\underline{Z}_{1y\partial} \cdot (\underline{I}_{\Phi} + \underline{k} \cdot \underline{I}_{01})}{\underline{I}_{01}}\right]}, \quad (1.27)$$

где \underline{I}_{01} и \underline{I}_{02} – токи нулевой последовательности поврежденной и магнитосвязанной линии;

$\underline{Z}_{12y\partial}$ – удельное сопротивление взаимной индукции.

3. Для повышения точности ОМП линий электропередачи путем

учета сопротивления питающей системы к моменту возникновения КЗ при однофазных КЗ [95] получено следующее выражение:

$$Z_{\text{КЗ}} = \frac{\text{Im}\left(\frac{\underline{U}_\Phi}{\underline{k} \cdot \underline{I}_0}\right) - \text{Im}\left[\frac{\underline{Z}_1 \cdot (\underline{I}_\Phi + \underline{k} \cdot \underline{I}_0)}{\underline{k} \cdot \underline{I}_0}\right]}{\text{Im}\left[\left(\frac{\underline{I}_\Phi}{\underline{I}_0} + \frac{\underline{U}_2}{\underline{I}_2} \cdot \underline{k}_1 + \underline{k}_2\right) \cdot \underline{P}\right]}, \quad (1.28)$$

где \underline{U}_2 и \underline{I}_2 – напряжение и ток нулевой последовательности;

\underline{k}_1 и \underline{k}_2 – комплексные коэффициенты, устанавливаемые способом определения расстояния до места повреждения.

Сущность рассматриваемого способа состоит в том, что производится формирование замераемого сопротивления с использованием отношения обратной последовательности к току обратной последовательности, которое пропорционально сопротивлению питающей системы к моменту возникновения КЗ.

4. Для повышения точности ОМП линий электропередачи сверхвысокого напряжения при однофазных КЗ [96] получено следующее выражение:

$$Z_{\text{КЗ}} = \frac{\text{Im}\left(\frac{\underline{U}_\Phi}{\underline{I}_{2\Phi}}\right)}{\text{Im}\left[\frac{\underline{I}_\Phi + \underline{k} \cdot \underline{I}_0}{\underline{I}_{2\Phi}} \cdot \underline{P}\right]}, \quad (1.29)$$

где $\underline{I}_{2\Phi}$ – ток обратной последовательности поврежденной фазы в месте замера.

Выражение (1.29) получается из уравнения петли короткого замыкания (1.22), в котором ток нулевой последовательности в месте повреждения $\underline{I}_{\text{K0}}$ представлен через симметричные составляющие как $3 \cdot \underline{I}_{\text{K0}} = 3 \cdot \underline{I}_{2\Phi\text{К}} = 3 \cdot \underline{k}_2 \cdot \underline{I}_{2\text{А}}$, где $\underline{I}_{2\Phi\text{К}}$ – ток обратной последовательности в месте повреждения; \underline{k}_2 – коэффициент токораспределения (отношение тока в месте повреждения к току в месте замера) для схемы обратной последовательности. Такое решение задачи следует из

того, что на линиях сверхвысокого напряжения фаза тока нулевой последовательности в месте произведения замера начинает значительно отличаться от фазы тока в месте КЗ. Причиной такого отличия является более медленное снижение активного удельного сопротивления нулевой последовательности ВЛ по сравнению с прямой (обратной) последовательностью при возрастании сечения провода. Объясняется подобный характер изменения сопротивления наличием в активном удельном сопротивлении нулевой последовательности постоянной составляющей, учитывающей потери активной мощности в земле и не зависящей от сечения провода.

Рассмотренный аналитический способ решения уравнения, составленного по петле КЗ, так же как и графический, допускает методическую погрешность, связанную с исключением переходного сопротивления, вводя допущение, что фазы токов нулевой или обратной последовательностей в месте повреждения с обеих концов линии совпадают.

Способы ОМП, основанные на использовании моделей.

Данная группа способов ОМП [97-99] достигает цели повышения точности за счет сокращения объема необходимой информации путем одностороннего по отношению к ЛЭП измерения входных величин и заключается в том, что выделяют напряжения и токи основных гармоник, подают напряжения основных гармоник на входы моделей, измеряют токи на указанных входах и сравнивают их с выделенными токами, подключают к каждой модели комплексную нагрузку в месте предполагаемого повреждения, устанавливают активные и реактивные проводимости комплексных нагрузок такими, чтобы токи основных гармоник на входах моделей и выделенных токов линии совпали, определяют углы комплексных нагрузок, выбирают нагрузку с нулевым углом и принимают, что место и характер повреждения соответствуют месту подключения указанной нагрузки и величинам ее активных проводимостей.

В каждой модели линии отводится присущее только ей одной место, к которому подключают регулируемый источник фазных напряжений. Число моделей определяется необходимой точностью. При программной реализации с интерполированием результатов их количество оказывается не слишком большим: чтобы обеспечить точность до 1 км, достаточно взять модели из расчета - одна модель на 10 км линии. Фактически при данном способе каждую модель выполняют из двух частей, образующих каскадное соединение и моделирующих разные части линии, а в совокупности – всю линию. Различие моделей

проявляется только в том, что у каждой свои части, не встречающиеся у других. Таким образом, каждая модель ориентирована на предсказание повреждения определенного участка линии. Повреждения устанавливают при помощи перечисленных операций над напряжениями и токами, измеренными на входе линии, токами на входах моделей и напряжениями источников, подключенных к местам соединения двух частей каждой модели.

Возможны ситуации, при которых определение места повреждения по минимуму напряжения источников не дает необходимой точности. Совокупность признаков способа дает полезный эффект в сочетании с такими операциями, которые в неблагоприятных ситуациях, когда минимум напряжения неглубокий, гарантируют сколь угодно высокую точность, определяемую только точностью задания параметров ЛЭП, а именно освобождает способ от методической погрешности. Операции осуществляются только при том условии, что минимальное напряжение окажется выше принятой уставки. Тогда вместо источников фазных напряжений подключают к моделям фазные комплексные нагрузки, устанавливают их активные и реактивные проводимости такими, чтобы основные гармоники токов на входах моделей и линии совпали, измеряют эти проводимости, сравнивают активные проводимости с уставкой (по проводимости), выбирают модели, у которых активная проводимость превышает уставку, определяют углы нагрузок, выбирают нагрузку с минимальным углом, а в заключение принимают, что место повреждения линии соответствует месту подключения указанной нагрузки, и судят о характере повреждения линии по соотношению проводимостей фаз указанной нагрузки.

Существует также другая модификация операций, осуществляемых тогда, когда минимальное напряжение оказывается выше уставки. В этой модификации ориентируются на использование аварийных слагаемых напряжений и токов (здесь под аварийными слагаемыми понимается разность между напряжениями или токами в аварийном и предаварийном режимах): в предаварийном режиме фиксируют основные гармоники напряжения и токов на входе линий модели, определяют разности основных гармоник напряжения и токов на входе линии в аварийном и предаварийном режимах, подают разностное напряжение на входы моделей, устанавливают напряжения источников равными соответствующим напряжениям до аварийного режима, включают комплексные нагрузки последовательно с источниками и устанавливают проводимости фаз нагрузки такими, чтобы основные гармоники токов на входах моделей совпали с разностными токами.

Для тех случаев, когда ЛЭП можно считать симметричной, можно выполнять модели частей линий в виде четырехполюсников нулевой последовательности и без нулевых фазных составляющих.

С входов 1 (рис.1.10) реальной линии снимаются фазные напряжения 2 и токи 3. Выделяют и используют их основные гармоники.

Схемы на рис.1.11 моделируют отрезки линии, начиная от ее входа, все разной длины. Модели 4, 5 изображены прямоугольниками, ширина которых соответствует длине моделируемых участков. На входы 6 всех моделей подается напряжение источника 7, равное $[\underline{U}(0)]$, а измеряются их разные входные токи 8, 9, равные соответственно $[\underline{I}_p(0)]$, $[\underline{I}_q(0)]$, где p, q – номера моделей. Каждая модель на рис.1.11 представляет собой $2n$ – полюсник, зажимы которого соответствуют точкам проводов линии и земли. К выходам модели на рис.1.11 подключены регулируемые источники 10, 11. Их напряжения обозначим $[\underline{U}(x_p)]$, $[\underline{U}(x_q)]$, где x_p и x_q – координаты соответствующей точки линии.

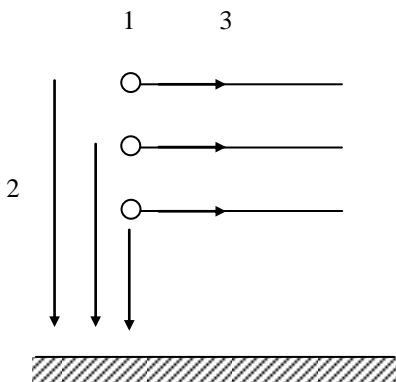


Рис.1.10 – Входы линии электропередачи, на которых измеряются напряжения и токи

На рис.1.12 показана модель 12 всей линии, к входным зажимам 13 которой приложено напряжение источника 14 предварительного режима $[\underline{U}_{пред}(0)]$, а к выходам 15 – напряжение источника 16 $[\underline{U}_{пред}(I)]$, подобранное так, что ток 17 на входе модели 12 совпадают с током 3 на входе линии в предварительном режиме $[\underline{I}_{пред}(0)]$. Остальные модели на рис.1.12 составлены каждая из двух частей –

начальных частей линии модели 4, 5 и конечных частей линии 18, 19. Входы 6 всех этих моделей объединены и к ним приложено напряжение источника 7 аварийного режима [$\underline{U}(0)$]. Выходы 15 вообще всех моделей объединены, т.е. источник 16 напряжений [$\underline{U}_{пред}(I)$] является общим для всех них. К промежуточным точкам моделей на рис.1.12 подключены комплексные [$\underline{Y}(x)$] нагрузки 20, 21, содержащие переменные резисторы 22, 23 и дроссели или конденсаторы 24, 25.

На рис.1.13,а все модели линии работают в том же предаварийном режиме, что и модель 12 на рис.1.12. Источники 14, 16 в этих схемах действуют одинаково. Но предназначение схем разное. Модель 12 нужна только для определения источников 16. В схемах на рис.1.13,а части моделей 4 и 18, 5 и 19 разделены с целью измерения промежуточных напряжений источников 26, 27 предаварийного режима ($[\underline{U}_{пред}(x)]$). Схема на рис.1.13,б повторяет модель с выделенным местом x_p , но с зашунтированными входами 6 и выходами 15. В эту схему введены источники 28 напряжений [$\underline{U}_{пред}(x_p)$], а последовательно с ними – комплексные нагрузки 20 того же состава, что и на рис.1.12.

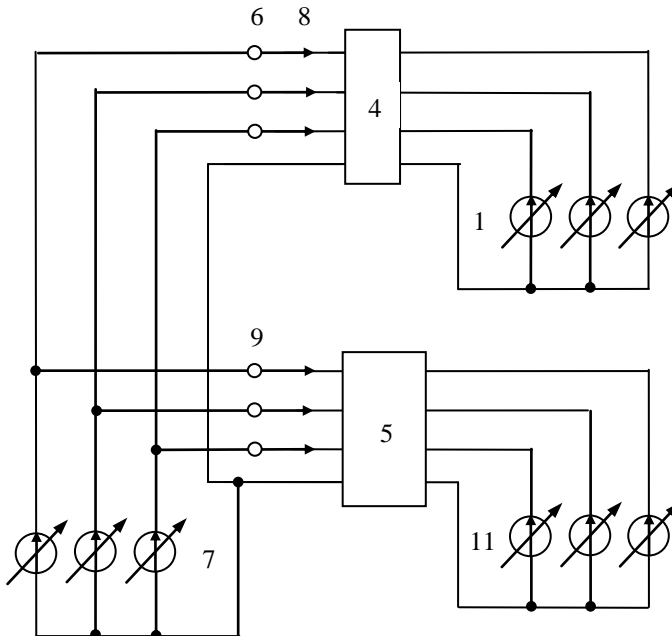


Рис.1.11 – Модели первых частей линии электропередачи

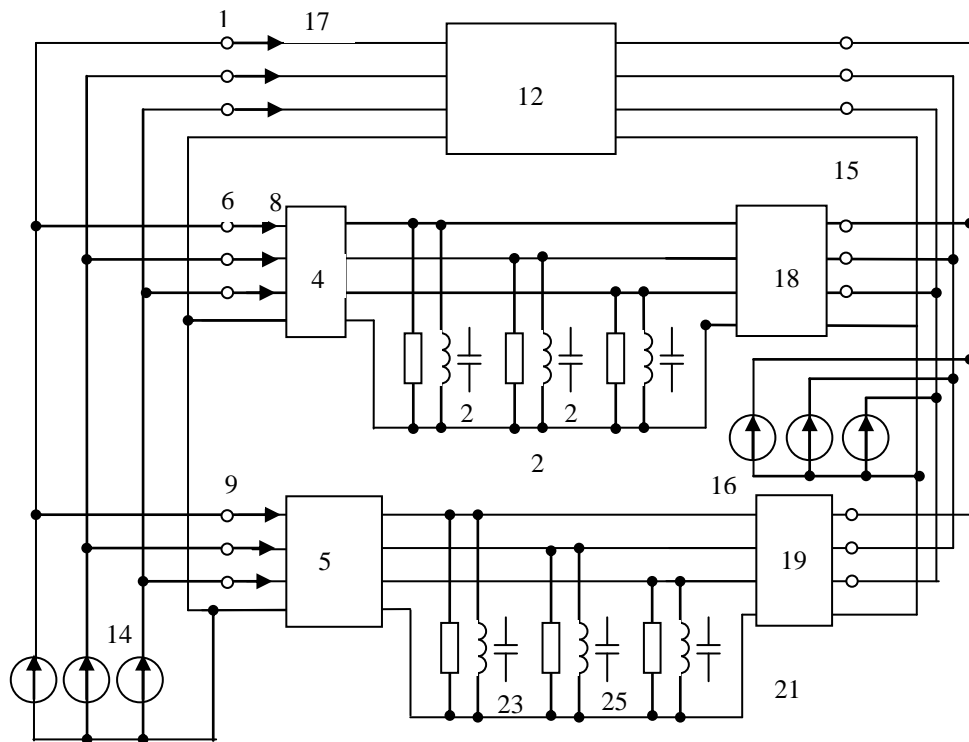


Рис.1.12 – Полные модели линии электропередачи, состоящие каждая из двух частей

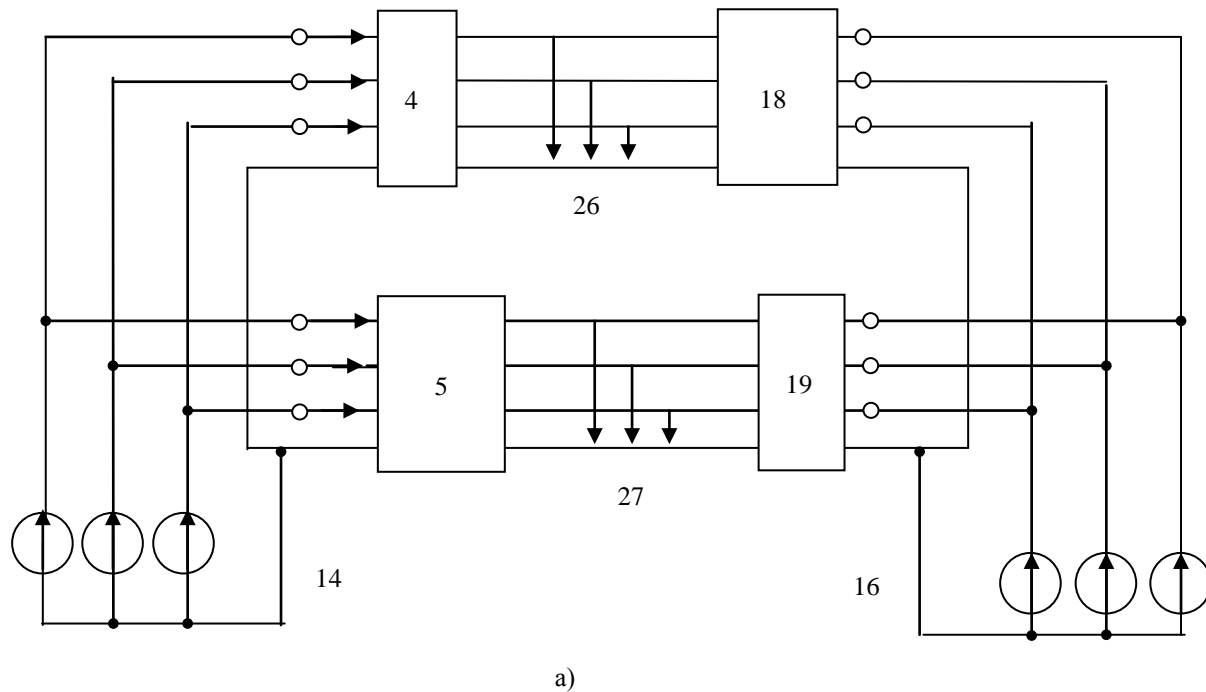
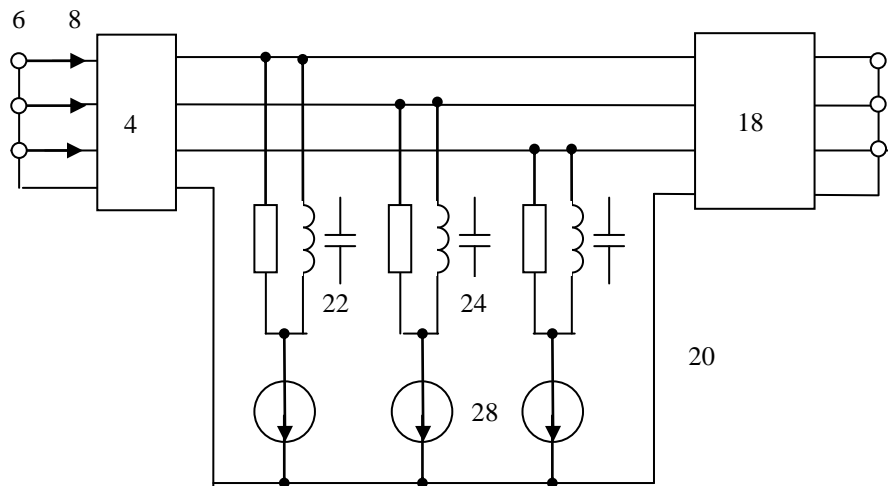


Рис. 1.13 – Полные модели линии электропередачи:
 а) для предаварийного режима; б) для аварийного режима



6)

Предположим, что модели 4, 5 уравновешены, т.е. токи 8, 9 совпадают с основной гармоникой токов 3, но все фазные и линейные напряжения источников 10, 11 оказались выше уставки. Подобная ситуация может сложиться при достаточно больших переходных сопротивлениях в месте КЗ. Тогда выполняют дальнейшие операции на полных моделях линии 12, а также моделях 4 и 18, 5 и 19. Модель 12 непосредственно с поиском повреждения не связана, а предназначена для запоминания предварительного напряжения на выходе ЛЭП.

Для определения координаты x места повреждения сравнивают активную и реактивную проводимости всех фаз комплексных нагрузок 20, 21. Прежде всего сравнивают активные проводимости $G_n(x)$ с уставкой (порогом) $G_{уст}$, отсекающей величины $1/G_n(x)$ в сотни ом, которые могут получиться как результат погрешностей моделирования. Отбирают только те значения $G_n(x)$, которые отвечают условию $G_n(x) > G_{уст}$. Затем сравнивают углы нагрузок $Y_n(x) = \arctg B_n(x)/G_n(x)$, или, что проще, отношения $B_n(x)/G_n(x)$, выбирая наименьшее из них, т.е. наиболее близкое к нулевому уровню. Предположим, что r -й модели 4 и 18 обнаружится, что для ее уравновешивания необходимо подключить практически чисто активную нагрузку (резистор 22) указанной фазы, а в подключении нагрузок 20 к остальным фазам необходимость не возникает. Из такой ситуации делается вывод об однофазном КЗ в одной фазе на расстоянии x_p от начала линии. Если же обнаружится, что модель уравновешивают две активные нагрузки, подключенные к двум фазам, то это укажет на двухфазное КЗ. Является ли оно связанным с землей или чисто междуфазным, укажет напряжение между земляными (нижними) выводами моделей 4, т.е. между нейтральными источниками 7 и нагрузок 20. В последнем случае это напряжение должно быть пренебрежимо мало.

Недостатком рассматриваемого способа ОМП является то, что напряжение источника 16, приложенного с противоположного конца линии в предаварийном и аварийном режиме принято постоянным, что в общем случае не соблюдается.

Методы одностороннего ОМП, использующие мгновенные значения. Эти методы основаны на решении уравнения петли короткого замыкания относительно расстояния до места повреждения, составленного по мгновенным значениям параметров аварийного режима [3,4,100]. Исходными материалами исследований, изложенных ниже, являются патент Франции [101] и частный случай его реализации, примененный в патенте [102].

Рассмотрим случай двухфазного КЗ. На рис.1.14 показана схема двухфазного КЗ между фазами А и В через переходное сопротивление.

Согласно [101] для любого момента времени справедливо следующее уравнение:

$$u_{AB} = u_A - u_B = lL \frac{di_{AB}}{dt} + lr i_{AB} + kR_{\Pi} i_{AB} = xv + lw, \quad (1.30)$$

где u_{AB} – мгновенное значение междуфазного напряжения;
 $i_{AB} = i_A - i_B$ – мгновенное значение тока со стороны ВЛ, где производится измерение; L и r – удельные индуктивность и активное сопротивление единицы длины системы "провод-провод" (прямой последовательности в расчете на два провода); k – коэффициент, учитывающий падение напряжения на переходном сопротивлении от тока i'_{AB} с противоположного конца ВЛ;

$$x = l + \frac{kR_{\Pi}}{r}; \quad v = r i_{AB}; \quad w = L \frac{di_{AB}}{dt}.$$

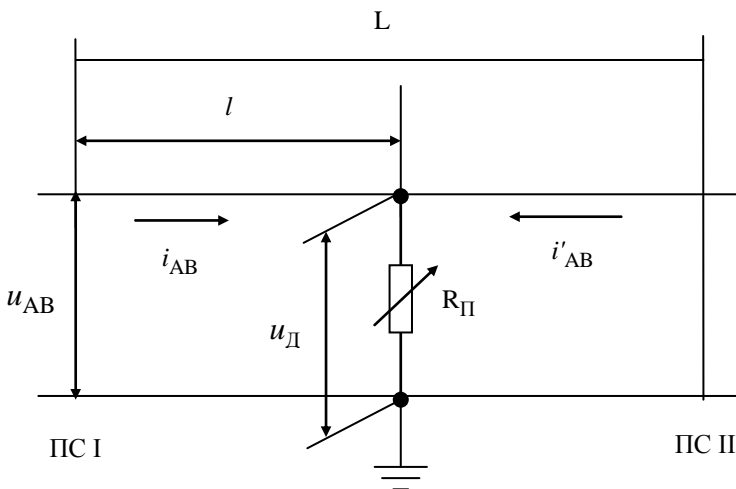


Рис. 1.14 – Схема двухфазного короткого замыкания через переходное сопротивление

Измеряя ток i_{AB} , его производную $\frac{di_{AB}}{dt}$ и напряжение u_{AB} для двух произвольных моментов времени t_1 и t_2 , получаем u_{AB1} , u_{AB2} , v_1 , v_2 , w_1 , w_2 , т.е. два уравнения:

$$\begin{aligned} u_{AB1} &= xv_1 + lw_1; \\ u_{AB2} &= xv_2 + lw_2. \end{aligned}$$

Решение их относительно двух неизвестных x и l позволяет найти искомое расстояние:

$$l = \frac{u_{AB1}v_2 - u_{AB2}v_1}{w_1v_2 - w_2v_1} = \frac{u_{AB1}i_{AB2} - u_{AB2}i_{AB1}}{L \left[\left(\frac{di_{AB1}}{dt} \right) - \left(\frac{di_{AB2}}{dt} \right) \right]}. \quad (1.31)$$

Согласно [102] достаточно фиксировать мгновенное значение тока для момента перехода тока КЗ через нуль. При $i_{AB} = 0$, $v = 0$ можно записать

$$\begin{aligned} (u_{AB})_{i=0} &= l(w)_{i=0}, \\ l &= \frac{(u_{AB})_{i=0}}{L \left(\frac{di_{AB}}{dt} \right)_{i=0}}. \end{aligned} \quad (1.32)$$

Если ток i'_{AB} не совпадает по фазе с током i_{AB} , то коэффициент k в два фиксированных момента времени имеет различные значения, вследствие чего параметр x тоже имеет разные значения, и величина l определяется с погрешностью. При переходе тока i_{AB} через нулевое значение ток i'_{AB} имеет какое-то значение (в зависимости от сдвига фаз), что также приводит к погрешности ОМП.

Для учета указанного обстоятельства во ВНИИЭ предложено усовершенствование методики ОМП, опирающееся на известные характеристики силовой дуги [103]. Поскольку градиент дуги составляет 1,5 кВ/м в большом диапазоне токов КЗ, а ее длина при $t \leq 0,1$ с. определяется расстоянием между проводами (4–10м), то падение напряже-

ния u_D составляет всего 4–5% амплитуды линейного напряжения и большую часть периода протекания тока повреждения через переходное сопротивление является постоянной величиной. Лишь вблизи перехода через нуль результирующего тока с обоих концов линии ($i = i_{AB} + i'_{AB}$) напряжение на дуге может быть иным.

Если исключить измерения в интервал вблизи перехода тока i через нуль, то можно записать

$$u_{AB} = lL \frac{di_{AB}}{dt} + lri_{AB} + u_D^* . \quad (1.33)$$

Символ "*" означает, что полярность напряжения дуги в два рассматриваемых момента времени может быть как одинаковой, так и разной. В этом случае, проведя измерение величин u_{AB1} , u_{AB2} , i_{AB1} , i_{AB2} , $\frac{di_{AB1}}{dt}$ и $\frac{di_{AB2}}{dt}$, для двух моментов времени можно получить два решения систем из двух уравнений вида (1.33):

$$l = \frac{u_{AB1} - u_{AB2}}{L \left[\left(\frac{di_{AB1}}{dt} \right) - \left(\frac{di_{AB2}}{dt} \right) \right] + r(i_{AB1} - i_{AB2})} ; \quad (1.34)$$

$$l' = \frac{u_{AB1} + u_{AB2}}{L \left[\left(\frac{di_{AB1}}{dt} \right) + \left(\frac{di_{AB2}}{dt} \right) \right] + r(i_{AB1} + i_{AB2})} . \quad (1.35)$$

Первое значение искомого расстояния (1.34) относится к одинаковой полярности напряжений на дуге в два момента времени, второе – к разной. Хотя практически допустима выдача персоналу двух точек места повреждения, на основе предварительных расчетов (или экспериментов) можно иметь условия для выбора момента замера, обеспечивающие однозначное решение. Кроме того, можно использовать для практических целей решение (1.33) с допущением $u_D^* = 0$:

$$l = \frac{u_{AB}}{L \frac{di_{AB}}{dt} + ri_{AB}}. \quad (1.36)$$

Если проводить такие измерения вблизи максимума напряжения u_{AB} , то величина $\left| u_D \right| \leq 0,05 \cdot u_{AB\max}$ и погрешность в искомом расстоянии будет заведомо меньше 5%.

Рассмотрим однофазное короткое замыкание. Для однофазного КЗ в фазе А справедливо выражение

$$u_A = x r_0 i_0 + l \left[r(i_A - i_0) + L \frac{d}{dt}(i_A - i_0) + L_0 \frac{di_0}{dt} \right], \quad (1.37)$$

где u_A – мгновенное напряжение фазы А; r и r_0 – удельное сопротивление соответственно прямой и нулевой последовательностей; L и L_0 – индуктивности прямой и нулевой последовательностей; i_A – мгновенное значение тока в фазе А со стороны измерения; i_0 – мгновенное значение тока нулевой последовательности с той же стороны; $x = l + \frac{kR_{II}}{r_0}$, где k – коэффициент, учитывающий ток нулевой последовательности с противоположного конца линии i'_0 .

В уравнении (1.37) два неизвестных – x и l . По замерам i_A , i_0 , u_A , $\frac{di_A}{dt}$ и $\frac{di_0}{dt}$ для двух моментов времени можно получить искомое расстояние l . В момент перехода тока через нуль (t_0) достаточно одного замера:

$$l = \frac{(u_A)_{t_0}}{(w_A)_{t_0}} = \frac{(u_A)_{t_0}}{r(i_A)_{t_0} + L \frac{d}{dt}(i_A - i_0)_{t_0} + L_0 \left(\frac{di_0}{dt} \right)_{t_0}}. \quad (1.38)$$

Выражение (1.38) дает результат с погрешностью обусловленной током нулевой последовательности с противоположного конца линии i'_0 , фаза которого в общем случае не совпадает с током i_0 .

В [3] изложено усовершенствование вышеизложенной методики:

Установившийся режим, переходное сопротивление постоянное. Ток нулевой последовательности, протекающий через переходное сопротивление в месте повреждения, можно записать в следующем виде:

$$i_{0R\Pi} = k_1 i_0 + m \frac{di_0}{dt}, \quad (1.39)$$

где $k_1 = \left(\frac{I_{0R\Pi}}{I_0} \right) \cos \varphi$ и $m = - \left(\frac{I_{0R\Pi}}{I_0 \omega} \right) \sin \varphi$ постоянные коэффициенты,

не зависящие от момента времени замера, в которых $I_{0R\Pi}$ – ток нулевой последовательности через переходное сопротивление, I_0 – ток нулевой последовательности со стороны замера, ω – круговая частота, φ – угол между векторами $I_{0R\Pi}$ и I_0

С учетом (1.39) выражение (1.36) примет вид:

$$u_A = l \left[r(i_A - i_0) + L \frac{d}{dt}(i_A - i_0) + L_0 \frac{di_0}{dt} + r_0 i_0 \right] + k_1 R_{\Pi} i_0 + m R_{\Pi} \frac{di_0}{dt}. \quad (1.40)$$

Представим уравнение (1.40) в следующем виде:

$$u_A = x v_A + l w_A + y \varepsilon, \quad (1.41)$$

где $\varepsilon = \frac{di_0}{dt}$; y – неизвестная величина, аналогичная x , показывающая,

что по трем замерам (в три момента времени) можно обеспечить точное решение.

Следовательно, добавление одного замера исключает погрешность, обусловленную углом сдвига фаз токов нулевой последовательности с двух концов линии в установившемся режиме.

Переходный режим, переходное сопротивление постоянно. В этом случае наличие аperiodической составляющей тока КЗ нарушает равенство левого и правого частей уравнения (1.39). При близких по значению постоянных времени T затухания аperiodических составля-

ющих токов нулевой последовательности с обоих концов линии выражение (1.39) можно записать в следующем виде:

$$i_{0R\Pi} = k_2 i_0 + m_1 \frac{di_{0nep}}{dt} + m_2 \frac{di_{0an}}{dt}, \quad (1.42)$$

где
$$m_1 = -\frac{I_{0R\Pi} \sin \varphi}{I_0 \omega}, \quad k_2 = \frac{I_{0R\Pi} \cos \varphi}{I_0} \quad \text{и}$$

$$m_2 = \frac{T}{I_{0an}} \left(\frac{I_{0R\Pi} \cos \varphi}{I_0} - I_{0R\Pi an} \right)$$

постоянные коэффициенты, не зависящие от момента времени замера, в которых I_{0an} – апериодическая составляющая тока нулевой последовательности со стороны замера, $I_{0R\Pi an}$ – апериодическая составляющая тока нулевой последовательности через переходное сопротивление, T – постоянная времени затухания тока I_0 .

Для получения апериодической составляющей i_{0an} и ее производной необходимо выделить среднее значение тока нулевой последовательности со стороны измерения за каждый период (промышленной частоты) в интервале измерения тока КЗ.

Запишем выражение (1.42) в следующем виде:

$$u_A = xv + lw + y\varepsilon' + z\varepsilon'', \quad (1.43)$$

где $\varepsilon' = \frac{di_{0nep}}{dt}$, $\varepsilon'' = \frac{di_{0an}}{dt}$, l, x, y, z – неизвестные величины.

Для ОМП требуются замеры токов, напряжений и производных в четыре момента времени и непрерывный замер среднего значения токов за все периоды протекания тока повреждения. Искомая величина l находится путем совместного решения четырех уравнений типа (1.43).

Следует отметить, что по мере увеличения разности постоянных времени затухания апериодических составляющих с обоих концов линии полученные соотношения нарушаются.

Установившейся режим, переходное сопротивление нестабильное. При однофазном КЗ переходное сопротивление целесообразно представить последовательным соединением постоянного сопро-

тивления заземления R_3 и переменного сопротивления дуги R_d . Согласно отмеченному выше за время $t \leq 0,1$ с на ВЛ с металлическими и железобетонными опорами длина дуги приблизительно равна длине гирлянды изоляторов (для ВЛ 110 – 220кВ 1,5 – 3 м). При этом падение напряжения на дуге u_d не превышает 2 – 4,5 кВ, или 2,5% амплитуды фазного напряжения. Если делать замеры в интервале напряжения поврежденной фазы 60 – 100% u_{\max} , то падением напряжения на дуге можно пренебречь и производить ОМП согласно вышеизложенным случаям однофазного КЗ через переходное сопротивление в установившемся и переходном режиме.

В том случае, когда переменным сопротивлением дуги пренебрегать нельзя, например, на ВЛ с деревянными опорами, исходное уравнение (1.43) усложняется:

$$u_A = l \left[r(i_A - i_0) + L \frac{d}{dt}(i_A - i_0) + L_0 \frac{di_0}{dt} + r_0 i_0 \right] + k_1 R_3 i_0 + m R_3 \frac{di_0}{dt} + u_d^* . \quad (1.44)$$

При этом для определения расстояния l требуется дополнительный (четвертый) замер мгновенных значений токов, напряжений и производных.

Наконец, для определения l при переходном процессе аналогичным образом требуется еще один (пятый) замер упомянутых величин.

Рассмотренные способы повышения точности ОМП по замерам мгновенных величин распространяются и на несимметричные линии.

Недостатком рассматриваемого способа является низкая помехозащищенность при измерении мгновенных значений.

2 МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ

В данном разделе рассмотрены математические модели одно-стороннего ОМП по ПАР при однофазном, двухфазном и трехфазном КЗ на ВЛ напряжением 110 кВ. При составлении математических моделей учитывался ряд факторов, влияющих на точность ОМП. К этим факторам относятся:

- переходное сопротивление в месте повреждения;
- система с противоположного замера конца линии;
- ответвления линии;
- магнитосвязанные линии.

2.1 Однофазное короткое замыкание

Рассмотрен общий случай однофазного КЗ через переходное сопротивление на двухцепной линии с ответвлением при двустороннем питании.

Под переходным сопротивлением R_{Π} для данного вида КЗ будем понимать активное суммарное сопротивление дуги в месте повреждения и сопротивления земли. На рис.2.1 показана схема замещения поврежденной фазы линии, представленная сосредоточенными параметрами, при однофазном КЗ через переходное сопротивление R_{Π} за ответвлением. Где ЦР – цифровой регистратор, контролирующий параметры режима со стороны системы С1.

Уравнение, составленное по петле КЗ для поврежденной фазы [104], согласно рис. 2.1 имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{\phi} = & I_1^{Iab} \cdot \underline{Z}_1^{ab} + I_2^{Iab} \cdot \underline{Z}_2^{ab} + I_0^{Iab} \cdot \underline{Z}_0^{ab} + I_0^{IIab} \cdot \underline{Z}_M^{ab} + I_1^{Ibc} \cdot \underline{Z}_1^{bc} + I_2^{Ibc} \cdot \underline{Z}_2^{bc} + \\ & + I_0^{Ibc} \cdot \underline{Z}_0^{bc} + I_0^{IIbc} \cdot \underline{Z}_M^{bc} + 3 \cdot R_{\Pi} \cdot (I_0^{Ibc} + I_0^{IIbc} + I_0^{C2}) \end{aligned} \quad , (2.1)$$

где $I_1^{Iab}, I_2^{Iab}, I_0^{Iab}, I_1^{Ibc}, I_2^{Ibc}, I_0^{Ibc}$ – токи прямой, обратной и нулевой последовательностей поврежденной фазы линии №1 на участках ab и bc соответственно;

$\underline{Z}_1^{ab}, \underline{Z}_2^{ab}, \underline{Z}_0^{ab}, \underline{Z}_1^{bc}, \underline{Z}_2^{bc}, \underline{Z}_0^{bc}$ – сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательностей участков ab и bc;

I_0^{IIab}, I_0^{IIbc} – токи нулевой последовательности параллельной линии (№2) на участках ab и bc;

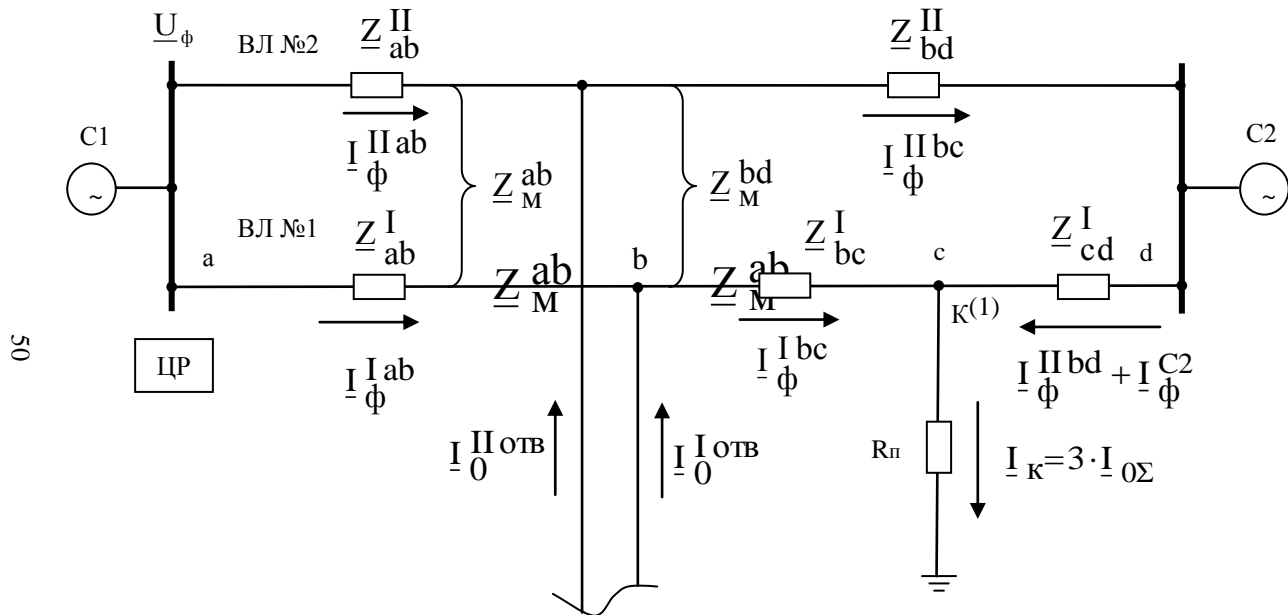


Рис. 2.1 – Схема замещения двухцепной линии при КЗ за ответвлением через переходное сопротивление R_n

$\underline{Z}_M^{ab}, \underline{Z}_M^{bc}$ – взаимное сопротивление линий на участке ab и bc;

R_Π – переходное сопротивление;

\underline{I}_0^{C2} – ток нулевой последовательности тока КЗ от системы C2 с противоположного замера конца линии.

Согласно классическому представлению однофазного КЗ на землю [105] токи симметричных составляющих в месте КЗ связаны следующим соотношением:

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_2 = \underline{I}_0. \quad (2.2)$$

При допущении, что условие (2.2) распространяется на питающие КЗ ветви, выражение (2.1) примет вид

$$\underline{U}_\Phi = \underline{I}_0^{Iab} \cdot \underline{Z}_\Sigma^{ab} + \underline{I}_0^{IIab} \cdot \underline{Z}_M^{ab} + \underline{I}_0^{Ibc} \cdot \underline{Z}_\Sigma^{bc} + \underline{I}_0^{IIbc} \cdot \underline{Z}_M^{bc} + 3R_\Pi \cdot (\underline{I}_0^{Ibc} + \underline{I}_0^{IIbc} + \underline{I}_0^{C2}), \quad (2.3)$$

где $\underline{Z}_\Sigma^{ab}, \underline{Z}_\Sigma^{bc}$ – суммарные сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательностей участков ab и bc, определяемые как $\underline{Z}_\Sigma^{ab} = \underline{Z}_1^{ab} + \underline{Z}_2^{ab} + \underline{Z}_0^{ab}$, $\underline{Z}_\Sigma^{bc} = \underline{Z}_1^{bc} + \underline{Z}_2^{bc} + \underline{Z}_0^{bc}$.

В рассматриваемом общем случае равенство (2.2) выполняется для подпитывающих ветвей только приближенно, из-за наличия токов нагрузки. Для корректного описания в выражение (2.3) введем добавки

$$\Delta \underline{I}_\Phi^{Iab} \cdot \underline{Z}_1^{ab} = (\underline{I}_\Phi^{Iab} - 3 \cdot \underline{I}_0^{Iab}) \cdot \underline{Z}_1^{ab}; \quad (2.4)$$

$$\Delta \underline{I}_\Phi^{Ibc} \cdot \underline{Z}_1^{bc} = (\underline{I}_\Phi^{Ibc} - 3 \cdot \underline{I}_0^{Ibc}) \cdot \underline{Z}_1^{bc},$$

которые будут учитывать реальное соотношение токов симметричных составляющих. Окончательное уравнение по петле КЗ будет иметь вид

$$\underline{U}_\Phi = \Delta \underline{U}_1 + \underline{I}_0^{Ibc} \cdot \underline{Z}_\Sigma^{bc} + \Delta \underline{I}_\Phi^{Ibc} \cdot \underline{Z}_1^{bc} + \underline{I}_0^{IIbc} \cdot \underline{Z}_M^{bc} + \Delta \underline{U}_R, \quad (2.5)$$

где $\Delta \underline{U}_1$ – падение напряжения на участке ab определяемое как

$$\Delta \underline{U}_1 = \underline{I}_0^{Iab} \cdot \underline{Z}_\Sigma^{ab} + \underline{I}_0^{IIab} \cdot \underline{Z}_M^{ab} + \Delta \underline{I}_\phi^{IIab} \cdot \underline{Z}_1^{ab}; \quad (2.6)$$

$\Delta \underline{U}_R$ – падение напряжения на переходном сопротивлении:

$$\Delta \underline{U}_R = 3 \cdot R \cdot (\underline{I}_0^{Ibc} + \underline{I}_0^{IIbc} + \underline{I}_0^{C2}) = 3 \cdot R_\Pi \cdot \underline{I}_{0K}. \quad (2.7)$$

Комплексное уравнение (2.5) содержит три неизвестные величины: переходное сопротивление R_Π , ток нулевой последовательности \underline{I}_0^{C2} со стороны системы C2 и сопротивление \underline{Z}^{bc} , определяемое расстоянием до места повреждения. Учитывая, что комплексные числа считаются равными между собой тогда и только тогда, когда в отдельности равны их вещественные и мнимые части [106], запишем комплексное уравнение (2.5) в виде системы двух вещественных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{Re}(\underline{U}_\phi) - \operatorname{Re}(\Delta \underline{U}_1) &= \operatorname{Re}(\underline{I}_0^{Ibc}) \cdot \underline{I}_\Sigma^{bc} - \operatorname{Im}(\underline{I}_0^{Ibc}) \cdot \underline{X}_\Sigma^{bc} + \operatorname{Re}(\underline{I}_0^{IIbc}) \cdot \underline{I}_M^{bc} - \\ &\quad - \operatorname{Im}(\underline{I}_0^{IIbc}) \cdot \underline{X}_M^{bc} + \operatorname{Re}(\Delta \underline{I}_\phi^{Ibc}) \cdot \underline{I}_1^{bc} - \operatorname{Im}(\Delta \underline{I}_\phi^{Ibc}) \cdot \underline{X}_1^{bc} + \\ &\quad + \operatorname{Re}(\Delta \underline{U}_R) \\ \operatorname{Im}(\underline{U}_\phi) - \operatorname{Im}(\Delta \underline{U}_1) &= \operatorname{Re}(\underline{I}_0^{Ibc}) \cdot \underline{X}_\Sigma^{bc} + \operatorname{Im}(\underline{I}_0^{Ibc}) \cdot \underline{I}_\Sigma^{bc} + \operatorname{Re}(\underline{I}_0^{IIbc}) \cdot \underline{X}_M^{bc} + \\ &\quad + \operatorname{Im}(\underline{I}_0^{IIbc}) \cdot \underline{I}_M^{bc} + \operatorname{Re}(\Delta \underline{I}_\phi^{Ibc}) \cdot \underline{X}_1^{bc} + \operatorname{Im}(\Delta \underline{I}_\phi^{Ibc}) \cdot \underline{I}_1^{bc} + \\ &\quad + \operatorname{Im}(\Delta \underline{U}_R) \end{aligned} \right\}; \quad (2.8)$$

где

$$\begin{aligned} \operatorname{Re}(\Delta \underline{U}_1) &= \operatorname{Re}(\underline{I}_0^{Iab}) \cdot \underline{I}_\Sigma^{ab} - \operatorname{Im}(\underline{I}_0^{Iab}) \cdot \underline{X}_\Sigma^{ab} + \operatorname{Re}(\underline{I}_0^{IIab}) \cdot \underline{I}_M^{ab} - \\ &\quad - \operatorname{Im}(\underline{I}_0^{IIab}) \cdot \underline{X}_M^{ab} + \operatorname{Re}(\Delta \underline{I}_\phi^{Iab}) \cdot \underline{I}_1^{ab} - \operatorname{Im}(\Delta \underline{I}_\phi^{Iab}) \cdot \underline{X}_1^{ab} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Im}(\Delta U_1) = & \text{Re}(I_0^{Iab}) \cdot X_\Sigma^{ab} + \text{Im}(I_0^{Iab}) \cdot r_\Sigma^{ab} + \text{Re}(I_0^{IIab}) \cdot X_M^{ab} + \\ & + \text{Im}(I_0^{IIab}) \cdot r_M^{ab} + \text{Re}(\Delta I_\phi^{Iab}) \cdot X_1^{ab} + \text{Im}(\Delta I_\phi^{Iab}) \cdot r_1^{ab} \end{aligned}$$

В выражении (2.8) выразим все сопротивления посредством коэффициентов связи относительно X_1^{bc} следующим образом:

$$r_\Sigma^{bc} = K_R \cdot X_1^{bc}, \quad X_\Sigma^{bc} = K_X \cdot X_1^{bc}, \quad r_M^{bc} = K_{MR} \cdot X_1^{bc},$$

$$X_M^{bc} = K_{MX} \cdot X_1^{bc}, \quad r_1^{bc} = K_{R1} \cdot X_1^{bc},$$

откуда

$$K_R = \frac{2 \cdot r_1^{bc} + r_0^{bc}}{X_1^{bc}}, \quad K_X = 2 + \frac{X_0^{bc}}{X_1^{bc}}, \quad K_{MR} = \frac{r_M^{bc}}{X_1^{bc}}, \quad (2.9)$$

$$K_{MX} = \frac{X_M^{bc}}{X_1^{bc}}, \quad K_{R1} = \frac{r_1^{bc}}{X_1^{bc}}.$$

Принимая во внимание равенство удельных сопротивлений участков bc и bd $\underline{Z}_{yd}^{bc} = \underline{Z}_{yd}^{bd}$, выражения (2.9) примет вид

$$K_R = \frac{2 \cdot r_1^{bd} + r_0^{bd}}{X_1^{bd}}, \quad K_X = 2 + \frac{X_0^{bd}}{X_1^{bd}}, \quad K_{MR} = \frac{r_M^{bd}}{X_1^{bd}}, \quad (2.10)$$

$$K_{MX} = \frac{X_M^{bd}}{X_1^{bd}}, \quad K_{R1} = \frac{r_1^{bd}}{X_1^{bd}}.$$

С учетом коэффициентов связи систему уравнений (2.10) запишем в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned}
\text{Re}(U_\phi) - \text{Re}(\Delta U_1) &= \left[\text{Re}(I_0^{\text{Ibc}}) \cdot K_R - \text{Im}(I_0^{\text{Ibc}}) \cdot K_X + \right. \\
&\quad + \text{Re}(I_0^{\text{IIbc}}) \cdot K_{MR} - \text{Im}(I_0^{\text{IIbc}}) \cdot K_{MX} + \\
&\quad \left. + \text{Re}(\Delta I_\phi^{\text{Ibc}}) \cdot K_{R1} - \text{Im}(\Delta I_\phi^{\text{Ibc}}) \right] \cdot X_1^{\text{bc}} + \\
&\quad + \text{Re}(\Delta U_R) \\
\text{Im}(U_\phi) - \text{Im}(\Delta U_1) &= \left[\text{Re}(I_0^{\text{Ibc}}) \cdot K_X + \text{Im}(I_0^{\text{Ibc}}) \cdot K_R + \right. \\
&\quad + \text{Re}(I_0^{\text{IIbc}}) \cdot K_{MX} + \text{Im}(I_0^{\text{IIbc}}) \cdot K_{MR} + \\
&\quad \left. + \text{Re}(\Delta I_\phi^{\text{Ibc}}) + \text{Im}(\Delta I_\phi^{\text{Ibc}}) \cdot K_{R1} \right] \cdot X_1^{\text{bc}} + \\
&\quad + \text{Im}(\Delta U_R)
\end{aligned} \right\}. \quad (2.11)$$

Учитывая выражение (2.7), выразим в уравнениях системы (2.11) величину R_Π :

$$\left. \begin{aligned}
\frac{\text{Re}(U_\phi) - \text{Re}(\Delta U_1) - \text{Re}(I_\Sigma) \cdot X_1^{\text{bc}}}{\text{Re}(I_{0K})} &= 3 \cdot R_\Pi \\
\frac{\text{Im}(U_\phi) - \text{Im}(\Delta U_1) - \text{Im}(I_\Sigma) \cdot X_1^{\text{bc}}}{\text{Im}(I_{0K})} &= 3 \cdot R_\Pi
\end{aligned} \right\}, \quad (2.12)$$

где

$$\begin{aligned}
\text{Re}(I_\Sigma) &= \text{Re}(I_0^{\text{Ibc}}) \cdot K_R - \text{Im}(I_0^{\text{Ibc}}) \cdot K_X + \text{Re}(I_0^{\text{IIbc}}) \cdot K_{MR} - \\
&\quad - \text{Im}(I_0^{\text{IIbc}}) \cdot K_{MX} + \text{Re}(\Delta I_\phi^{\text{Ibc}}) \cdot K_{R1} - \text{Im}(\Delta I_\phi^{\text{Ibc}})
\end{aligned} ;$$

$$\begin{aligned} \text{Im}(I_{\Sigma}) &= \text{Re}(I_0^{Ibc}) \cdot K_X + \text{Im}(I_0^{Ibc}) \cdot K_R + \text{Re}(I_0^{IIbc}) \cdot K_{MX} + \\ &+ \text{Im}(I_0^{IIbc}) \cdot K_{MR} + \text{Re}(\Delta I_{\phi}^{Ibc}) + \text{Im}(\Delta I_{\phi}^{Ibc}) \cdot K_{R1} \end{aligned} ;$$

$$\text{Re}(I_{0K}) = \text{Re}(I_0^{Ibc}) + \text{Re}(I_0^{IIbc}) + \text{Re}(I_0^{C2}) ;$$

$$\text{Im}(I_{0K}) = \text{Im}(I_0^{Ibc}) + \text{Im}(I_0^{IIbc}) + \text{Im}(I_0^{C2}) .$$

Полученная система уравнений (2.12) позволяет исключить неизвестную величину R_{Π} :

$$\frac{\text{Re}(U_{\phi}) - \text{Re}(\Delta U_1) - \text{Re}(I_{\Sigma}) \cdot X_1^{bc}}{\text{Re}(I_{0K})} = \frac{\text{Im}(U_{\phi}) - \text{Im}(\Delta U_1) - \text{Im}(I_{\Sigma}) \cdot X_1^{bc}}{\text{Im}(I_{0K})} . \quad (2.13)$$

Решение уравнения (2.13) относительно величины X_1^{bc} имеет следующий вид:

$$X_1^{bc} = \frac{\text{Re}(U_{\phi}) - \text{Re}(\Delta U_1) - [\text{Im}(U_{\phi}) - \text{Im}(\Delta U_1)] \cdot \frac{\text{Re}(I_{0K})}{\text{Im}(I_{0K})}}{\text{Re}(I_{\Sigma}) - \text{Im}(I_{\Sigma}) \cdot \frac{\text{Re}(I_{0K})}{\text{Im}(I_{0K})}} . \quad (2.14)$$

Полученное выражение имеет две неизвестные величины: искомое сопротивление X_1^{bc} и ток I_0^{C2} от системы C2 в составе тока I_{0K} . Представим (2.14) в следующем виде:

$$X_1^{bc} = \frac{\text{Re}(U_{\phi}) - \text{Re}(\Delta U_1) - [\text{Im}(U_{\phi}) - \text{Im}(\Delta U_1)] \cdot \text{ctg}\varphi_R}{\text{Re}(I_{\Sigma}) - \text{Im}(I_{\Sigma}) \cdot \text{ctg}\varphi_R} , \quad (2.15)$$

где

$$\text{ctg}\varphi_R = \frac{\text{Re}(I_{0K})}{\text{Im}(I_{0K})} = \frac{\text{Re}(I_0^{Ibc}) + \text{Re}(I_0^{IIbc}) + \text{Re}(I_0^{C2})}{\text{Im}(I_0^{Ibc}) + \text{Im}(I_0^{IIbc}) + \text{Im}(I_0^{C2})} . \quad (2.16)$$

Так как токи КЗ в сети одной ступени напряжения близки по фазе (для сети 110 кВ примерно 70°), то можно сделать допущение, что неучет тока I_0^{C2} от системы C2 при замере с одной стороны не внесет существенной погрешности в определении реактивного сопротивления искомого участка линии X_1^{bc} по формуле (2.15). Следовательно, выражение (2.15) полностью определено при замере с одной стороны и допущении, что

$$\operatorname{ctg}\varphi_R \approx \frac{\operatorname{Re}(I_0^{Ibc}) + \operatorname{Re}(I_0^{IIbc})}{\operatorname{Im}(I_0^{Ibc}) + \operatorname{Im}(I_0^{IIbc})}. \quad (2.17)$$

На основании вышеприведенных выкладок можно предложить расчетную формулу для определения расстояния до места повреждения при однофазном КЗ по ПАР одного из питающих концов линии в сети с эффективно заземленной нейтралью:

- при однофазном КЗ на двухцепной линии за ответвлением (рис.2.1):

$$L_X = L_{ab} + \frac{\operatorname{Re}(U_\phi) - \operatorname{Re}(\Delta U_1) - [\operatorname{Im}(U_\phi) - \operatorname{Im}(\Delta U_1)] \cdot \operatorname{ctg}\varphi_R}{\operatorname{Re}(I_\Sigma) - \operatorname{Im}(I_\Sigma) \cdot \operatorname{ctg}\varphi_R} \times \\ \times \frac{1}{X_{1yd}^{bd}}, \quad (2.18)$$

где L_X – искомое расстояние;

L_{ab} – длина участка линии до ответвления;

U_ϕ – напряжения поврежденной особой фазы;

X_{1yd}^{bd} – удельное реактивное сопротивление прямой последовательности участка bd поврежденной линии.

- при однофазном КЗ на двухцепной линии перед ответвлением:

$$L_X = \frac{\operatorname{Re}(U_\phi) - \operatorname{Im}(U_\phi) \cdot \operatorname{ctg}\varphi_R}{\operatorname{Re}(I_\Sigma) - \operatorname{Im}(I_\Sigma) \cdot \operatorname{ctg}\varphi_R} \cdot \frac{1}{X_{1yd}^{ab}}, \quad (2.19)$$

где X_{1yd}^{ab} – удельное реактивное сопротивление прямой последовательности участка ab поврежденной линии;

$$\operatorname{Re}(I_{\Sigma}) = \operatorname{Re}(I_0^{\text{Iab}}) \cdot K_R - \operatorname{Im}(I_0^{\text{Iab}}) \cdot K_X + \operatorname{Re}(I_0^{\text{IIab}}) \cdot K_{MR} -$$

$$- \operatorname{Im}(I_0^{\text{IIab}}) \cdot K_{MX} + \operatorname{Re}(\Delta I_{\phi}^{\text{Iab}}) \cdot K_{R1} - \operatorname{Im}(\Delta I_{\phi}^{\text{Iab}})$$

$$\operatorname{Im}(I_{\Sigma}) = \operatorname{Re}(I_0^{\text{Iab}}) \cdot K_X + \operatorname{Im}(I_0^{\text{Iab}}) \cdot K_R + \operatorname{Re}(I_0^{\text{IIab}}) \cdot K_{MX} +$$

$$+ \operatorname{Im}(I_0^{\text{IIab}}) \cdot K_{MR} + \operatorname{Re}(\Delta I_{\phi}^{\text{Iab}}) + \operatorname{Im}(\Delta I_{\phi}^{\text{Iab}}) \cdot K_{R1}$$

$$\operatorname{Re}(\Delta I_{\phi}^{\text{Iab}}) = \operatorname{Re}(I_{\phi}^{\text{Iab}}) - \operatorname{Re}(3 \cdot I_0^{\text{Iab}});$$

$$\operatorname{Im}(\Delta I_{\phi}^{\text{Iab}}) = \operatorname{Im}(I_{\phi}^{\text{Iab}}) - \operatorname{Im}(3 \cdot I_0^{\text{Iab}});$$

$$K_R = \frac{2 \cdot \mathbf{r}_1^{\text{ab}} + \mathbf{r}_0^{\text{ab}}}{\mathbf{X}_1^{\text{ab}}}; \quad K_X = 2 + \frac{\mathbf{X}_0^{\text{ab}}}{\mathbf{X}_1^{\text{ab}}};$$

$$K_{MR} = \frac{\mathbf{r}_M^{\text{ab}}}{\mathbf{X}_1^{\text{ab}}}; \quad K_{MX} = \frac{\mathbf{X}_M^{\text{ab}}}{\mathbf{X}_1^{\text{ab}}}; \quad K_{R1} = \frac{\mathbf{r}_1^{\text{ab}}}{\mathbf{X}_1^{\text{ab}}}.$$

- при однофазном КЗ на одноцепной линии за ответвлением (рис.2.2) расчетное выражение аналогично выражению (2.19), но без составляющих, учитывающих наличие магнитосвязанной линии:

$$\operatorname{Re}(U_1) = \operatorname{Re}(I_0^{\text{ab}}) \cdot \mathbf{r}_{\Sigma}^{\text{ab}} - \operatorname{Im}(I_0^{\text{ab}}) \cdot \mathbf{X}_{\Sigma}^{\text{ab}} + \operatorname{Re}(\Delta I_{\phi}^{\text{ab}}) \cdot \mathbf{r}_1^{\text{ab}} - \operatorname{Im}(\Delta I_{\phi}^{\text{ab}}) \cdot \mathbf{X}_1^{\text{ab}};$$

$$\operatorname{Im}(U_1) = \operatorname{Re}(I_0^{\text{ab}}) \cdot \mathbf{X}_{\Sigma}^{\text{ab}} + \operatorname{Im}(I_0^{\text{ab}}) \cdot \mathbf{r}_{\Sigma}^{\text{ab}} + \operatorname{Re}(\Delta I_{\phi}^{\text{ab}}) \cdot \mathbf{X}_1^{\text{ab}} + \operatorname{Im}(\Delta I_{\phi}^{\text{ab}}) \cdot \mathbf{r}_1^{\text{ab}};$$

$$\operatorname{Re}(I_{\Sigma}) = \operatorname{Re}(I_0^{\text{bc}}) \cdot K_R - \operatorname{Im}(I_0^{\text{bc}}) \cdot K_X + \operatorname{Re}(\Delta I_{\phi}^{\text{bc}}) \cdot K_{R1} - \operatorname{Im}(\Delta I_{\phi}^{\text{bc}});$$

$$\operatorname{Im}(I_{\Sigma}) = \operatorname{Re}(I_0^{\text{bc}}) \cdot K_X + \operatorname{Im}(I_0^{\text{bc}}) \cdot K_R + \operatorname{Re}(\Delta I_{\phi}^{\text{bc}}) + \operatorname{Im}(\Delta I_{\phi}^{\text{bc}}) \cdot K_{R1}.$$

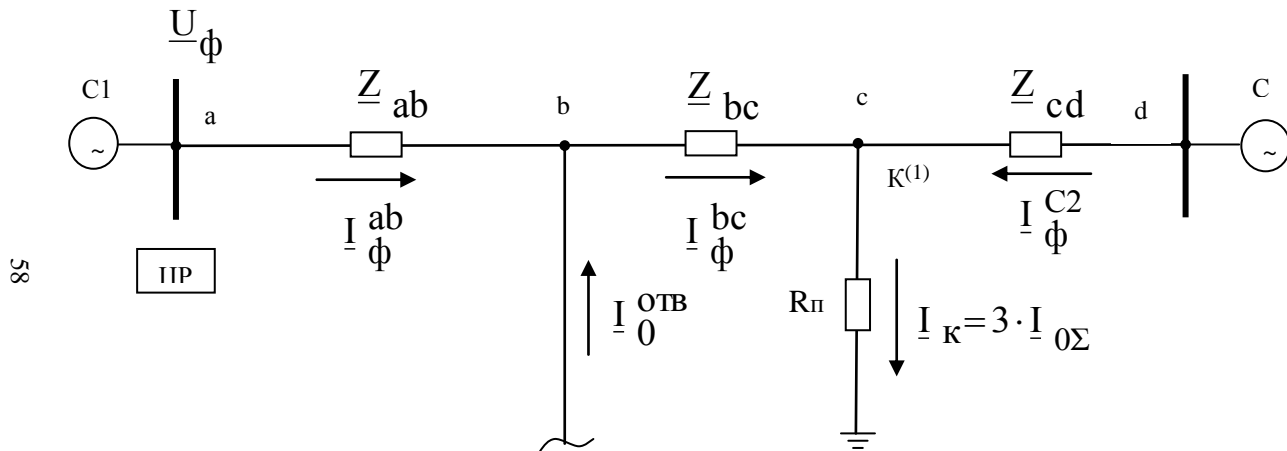


Рис. 2.2 – Схема замещения одноцепной линии при КЗ за ответвлением
через переходное сопротивление R_Π

- при однофазном КЗ на одноцепной линии перед ответвлением расчетное выражение аналогично выражению (2.18), но без составляющих, учитывающих наличие магнитосвязанной линии:

$$\operatorname{Re}(I_{\Sigma}) = \operatorname{Re}(I_0^{ab}) \cdot K_R - \operatorname{Im}(I_0^{ab}) \cdot K_X + \operatorname{Re}(\Delta I_{\phi}^{ab}) \cdot K_{R1} - \operatorname{Im}(\Delta I_{\phi}^{ba}) ;$$

$$\operatorname{Im}(I_{\Sigma}) = \operatorname{Re}(I_0^{ab}) \cdot K_X + \operatorname{Im}(I_0^{ab}) \cdot K_R + \operatorname{Re}(\Delta I_{\phi}^{ab}) + \operatorname{Im}(\Delta I_{\phi}^{ab}) \cdot K_{R1} .$$

Учет влияния ответвления. Использование регистратора на одном из концов линии (рис.2.1), т.е. при одностороннем измерении позволяет иметь информацию о ПАР только в месте замера. Наличие ответвления на поврежденной линии при КЗ за ответвлением изменяет потокораспределение вдоль всей линии. Это приводит к появлению дополнительной неизвестной величины в выражении (2.14). Этой величиной является I_{ϕ}^{Ibc} – ток поврежденной линии после ответвления.

Разница токов в месте замера I_{ϕ}^{Iab} и тока после ответвления I_{ϕ}^{Ibc} определяется током ответвления:

$$I_{\phi}^{Iab} + I_{\phi}^{Iотв} = I_{\phi}^{Ibc} . \quad (2.20)$$

При учете ответвления прежде всего следует отметить тот факт, что на ток ответвления влияет режим работы трансформаторов ответвления. Наличие заземленных нейтралей трансформаторов ответвления приводит к появлению тока нулевой последовательности ответвления, который прежде всего и определяет полный ток ответвления при однофазном КЗ. Поэтому рассмотрим сначала учет тока нулевой последовательности ответвления.

Ток нулевой последовательности ответвления будет иметь место только в случае заземленных нейтралей трансформаторов ответвления при КЗ связанных с землей. Так как нас интересует однофазное КЗ за ответвлением, то рассмотрим схему замещения нулевой последовательности поврежденной фазы двухцепной линии с ответвлением при заземленном режиме работы нейтралей трансформаторов ответвления, изображенную на рис.2.3.

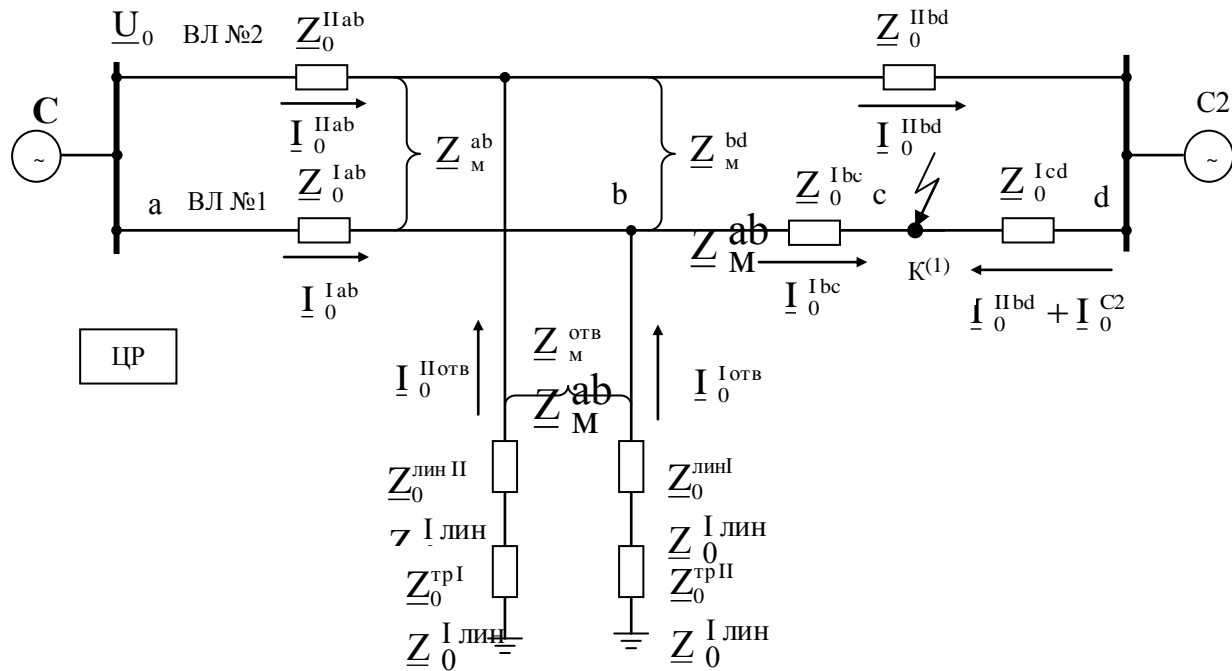


Рис. 2.3 – Схема замещения нулевой последовательности двухцепной линии с ответвлением при КЗ за ответвлением

Согласно схеме замещения напряжение нулевой последовательности в месте подключения ответвления равно

$$\begin{aligned}\underline{U}_0^{I\text{отв}} &= \underline{U}_0^I - \Delta\underline{U}_0^{Iab}, \\ \underline{U}_0^{II\text{отв}} &= \underline{U}_0^{II} - \Delta\underline{U}_0^{IIab},\end{aligned}\tag{2.21}$$

где \underline{U}_0^I и \underline{U}_0^{II} – напряжения нулевой последовательности линий I и II в месте замера;

$\Delta\underline{U}_0^{Iab}$ и $\Delta\underline{U}_0^{IIab}$ – падения напряжения нулевой последовательности на участке ab линий I и II, определяемые следующими выражениями:

$$\begin{aligned}\Delta\underline{U}_0^{Iab} &= \underline{I}_0^{Iab} \cdot \underline{Z}_0^{ab} + \underline{I}_0^{IIab} \cdot \underline{Z}_M^{ab}; \\ \Delta\underline{U}_0^{IIab} &= \underline{I}_0^{IIab} \cdot \underline{Z}_0^{ab} + \underline{I}_0^{Iab} \cdot \underline{Z}_M^{ab}.\end{aligned}\tag{2.22}$$

Токи нулевой последовательности найдем из уравнений, составленных для ответвления:

$$\begin{aligned}\underline{I}_0^{I\text{отв}} \cdot \underline{Z}_0^{I\text{отв}} + \underline{I}_0^{II\text{отв}} \cdot \underline{Z}_M^{\text{отв}} &= -\underline{U}_0^{I\text{отв}}, \\ \underline{I}_0^{I\text{отв}} \cdot \underline{Z}_M^{\text{отв}} + \underline{I}_0^{II\text{отв}} \cdot \underline{Z}_0^{II\text{отв}} &= -\underline{U}_0^{II\text{отв}},\end{aligned}\tag{2.23}$$

где $\underline{Z}_0^{I\text{отв}}$ и $\underline{Z}_0^{II\text{отв}}$ – суммарное сопротивление нулевой последовательности ответвления I и II, состоящее из сопротивления нулевой последовательности линии и сопротивления нулевой последовательности трансформатора [107]: $\underline{Z}_0^{I\text{отв}} = \underline{Z}_0^{I\text{лин}} + \underline{Z}_0^{I\text{тр}}$;

$$\underline{Z}_0^{II\text{отв}} = \underline{Z}_0^{II\text{лин}} + \underline{Z}_0^{II\text{тр}};$$

$\underline{Z}_M^{\text{отв}}$ – сопротивление взаимной индукции линий I и II ответвления.

С учетом (2.21) и (2.22) выражение (2.23) примет следующий вид:

$$\Delta \underline{U}_0^I - \underline{I}_0^{Iab} \cdot \underline{Z}_0^{ab} - \underline{I}_0^{IIab} \cdot \underline{Z}_M^{ab} = -\underline{I}_0^{IOTB} \cdot \underline{Z}_0^{IOTB} - \underline{I}_0^{IIOTB} \cdot \underline{Z}_M^{OTB}; \quad (2.24)$$

$$\Delta \underline{U}_0^{II} - \underline{I}_0^{Iab} \cdot \underline{Z}_0^{ab} - \underline{I}_0^{IIab} \cdot \underline{Z}_M^{ab} = -\underline{I}_0^{IOTB} \cdot \underline{Z}_M^{OTB} - \underline{I}_0^{IIOTB} \cdot \underline{Z}_0^{IIOTB}.$$

Решение уравнения (2.24) дает значение токов нулевой последовательности ответвления:

$$\underline{I}_0^{IOTB} = \frac{\begin{vmatrix} -\underline{U}_0^{IOTB} & \underline{Z}_M^{OTB} \\ -\underline{U}_0^{IIOTB} & \underline{Z}_0^{IIOTB} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} \underline{Z}_0^{IOTB} & \underline{Z}_M^{OTB} \\ \underline{Z}_M^{OTB} & \underline{Z}_0^{IIOTB} \end{vmatrix}}; \quad (2.25)$$

$$\underline{I}_0^{IIOTB} = \frac{\begin{vmatrix} \underline{Z}_0^{IOTB} & -\underline{U}_0^{IOTB} \\ \underline{Z}_M^{OTB} & -\underline{U}_0^{IIOTB} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} \underline{Z}_0^{IOTB} & \underline{Z}_M^{OTB} \\ \underline{Z}_M^{OTB} & \underline{Z}_0^{IIOTB} \end{vmatrix}}.$$

Рассмотрим учет токов прямой и обратной последовательностей ответвления. Токи прямой и обратной последовательностей ответвления будут иметь место при любых режимах работы нейтралей трансформаторов ответвления, так как их путь протекания не связан с землей. Их точный расчет затруднен учетом реального сопротивления нагрузки и возможной подпиткой от двигателей. При известных сопротивлениях нагрузки и неучете подпитки от двигателей токи прямой и обратной последовательностей можно рассчитать по схеме, изображенной на рис.2.4. На рис.2.4 показана схема замещения прямой и обратной последовательностей поврежденной фазы линии с ответвлением при однофазном КЗ за ответвлением. Отличие от схемы замещения нулевой последовательности заключается в отсутствии сопротивления взаимосвязи между параллельными линиями. Поэтому схемы замещения прямой и обратной последовательностей для двухцепной линии не имеет взаимных сопротивлений.

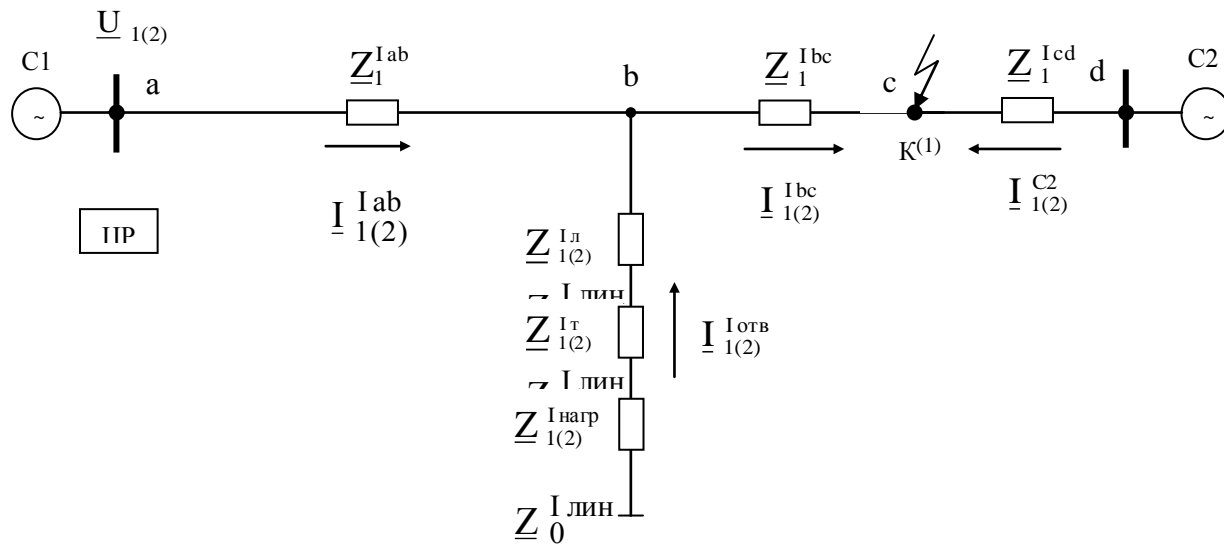


Рис. 2.4 – Схема замещения прямой и обратной последовательностей линии
с ответвлением при КЗ за ответвлением

Аналогично нулевой последовательности напряжение прямой и обратной последовательностей в месте подключения ответвления (рис.2.4) равны

$$\begin{aligned}\underline{U}_1^{I_{отв}} &= \underline{U}_1^I - \underline{I}_1^{I_{ab}} \cdot \underline{Z}_1^{I_{ab}}; \\ \underline{U}_2^{I_{отв}} &= \underline{U}_2^I - \underline{I}_2^{I_{ab}} \cdot \underline{Z}_2^{I_{ab}},\end{aligned}\tag{2.26}$$

где \underline{U}_1^I и \underline{U}_2^I – напряжения прямой и обратной последовательностей в месте замера;
 $\underline{I}_1^{I_{ab}}$ и $\underline{I}_2^{I_{ab}}$ – токи прямой и обратной последовательностей участка линии ab;
 $\underline{Z}_1^{I_{ab}}$ и $\underline{Z}_2^{I_{ab}}$ – сопротивления прямой и обратной последовательностей участка линии ab.

Из уравнений ответвлений

$$\begin{aligned}\underline{I}_1^{I_{отв}} \cdot \underline{Z}_1^{I_{отв}} &= -\underline{U}_1^{I_{отв}}; \\ \underline{I}_2^{I_{отв}} \cdot \underline{Z}_2^{I_{отв}} &= -\underline{U}_2^{I_{отв}},\end{aligned}\tag{2.27}$$

где $\underline{Z}_1^{I_{отв}}$ и $\underline{Z}_2^{I_{отв}}$ – суммарные сопротивления прямой и обратной последовательностей ответвления состоящих из соответствующих сопротивлений линии, трансформатора и нагрузки:
 $\underline{Z}_1^{I_{отв}} = \underline{Z}_1^{I_{лли}} + \underline{Z}_1^{I_{тг}} + \underline{Z}_1^{I_{нагр}}$; $\underline{Z}_2^{I_{отв}} = \underline{Z}_2^{I_{лли}} + \underline{Z}_2^{I_{тг}} + \underline{Z}_2^{I_{нагр}}$,
найдем токи прямой и обратной последовательностей ответвления:

$$\begin{aligned}\underline{I}_1^{I_{отв}} &= \frac{-\underline{U}_1^{I_{отв}}}{\underline{Z}_1^{I_{отв}}}; \\ \underline{I}_2^{I_{отв}} &= \frac{-\underline{U}_2^{I_{отв}}}{\underline{Z}_2^{I_{отв}}}.\end{aligned}\tag{2.28}$$

Полный ток ответвления в поврежденной фазе равен

$$\underline{I}_{\Phi}^{I_{OTB}} = \underline{I}_1^{I_{OTB}} + \underline{I}_2^{I_{OTB}} + \underline{I}_0^{I_{OTB}}. \quad (2.29)$$

На основании сделанных выкладок в формулах (2.18) и (2.19) с учетом тока ответвления будут иметь место следующие соотношения:

- в формуле (2.18):

$$\begin{aligned} \operatorname{Re}(\Delta I_{\Phi}^{I_{bc}}) &= \operatorname{Re}(I_{\Phi}^{I_{ab}}) - \operatorname{Re}(3 \cdot I_0^{I_{ab}}) + \operatorname{Re}(I_{\Phi}^{I_{OTB}}) - \operatorname{Re}(3 \cdot I_0^{I_{OTB}}) = \\ &= \operatorname{Re}(\Delta I_{\Phi}^{I_{ab}}) + \operatorname{Re}(\Delta I_{\Phi}^{I_{OTB}}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \operatorname{Im}(\Delta I_{\Phi}^{I_{bc}}) &= \operatorname{Im}(I_{\Phi}^{I_{ab}}) - \operatorname{Im}(3 \cdot I_0^{I_{ab}}) + \operatorname{Im}(I_{\Phi}^{I_{OTB}}) - \operatorname{Im}(3 \cdot I_0^{I_{OTB}}) = \\ &= \operatorname{Im}(\Delta I_{\Phi}^{I_{ab}}) + \operatorname{Im}(\Delta I_{\Phi}^{I_{OTB}}) \end{aligned}$$

$$\operatorname{Re}(I_0^{I_{bc}}) = \operatorname{Re}(I_0^{I_{ab}}) + \operatorname{Re}(I_0^{I_{OTB}}); \quad \operatorname{Im}(I_0^{I_{bc}}) = \operatorname{Im}(I_0^{I_{ab}}) + \operatorname{Im}(I_0^{I_{OTB}});$$

$$\operatorname{Re}(I_0^{II_{bc}}) = \operatorname{Re}(I_0^{II_{ab}}) + \operatorname{Re}(I_0^{II_{OTB}}),$$

$$\operatorname{Im}(I_0^{II_{bc}}) = \operatorname{Im}(I_0^{II_{ab}}) + \operatorname{Im}(I_0^{II_{OTB}});$$

где $\Delta I_{\Phi}^{I_{OTB}} = \underline{I}_{\Phi}^{I_{OTB}} - 3 \cdot \underline{I}_0^{I_{OTB}}$ – добавка тока, учитывающая реальное соотношение симметричных составляющих тока ответвления (аналогично (2.4).

- в формуле (2.19):

$$\begin{aligned} \operatorname{Re}(\Delta I_{\Phi}^{I_{bc}}) &= \operatorname{Re}(I_{\Phi}^{I_{ab}}) - \operatorname{Re}(3 \cdot I_0^{I_{ab}}) + \operatorname{Re}(I_{\Phi}^{I_{OTB}}) - \operatorname{Re}(3 \cdot I_0^{I_{OTB}}) = \\ &= \operatorname{Re}(\Delta I_{\Phi}^{I_{ab}}) + \operatorname{Re}(\Delta I_{\Phi}^{I_{OTB}}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\operatorname{Im}(\Delta I_{\phi}^{I^{bc}}) &= \operatorname{Im}(I_{\phi}^{I^{ab}}) - \operatorname{Im}(3 \cdot I_0^{I^{ab}}) + \operatorname{Im}(I_{\phi}^{I^{отв}}) - \operatorname{Im}(3 \cdot I_0^{I^{отв}}) = \\
&= \operatorname{Im}(\Delta I_{\phi}^{I^{ab}}) + \operatorname{Im}(\Delta I_{\phi}^{I^{отв}})
\end{aligned}$$

$$\operatorname{Re}(I_0^{I^{bc}}) = \operatorname{Re}(I_0^{I^{ab}}) + \operatorname{Re}(I_0^{I^{отв}}), \quad \operatorname{Im}(I_0^{I^{bc}}) = \operatorname{Im}(I_0^{I^{ab}}) + \operatorname{Im}(I_0^{I^{отв}}).$$

2.2 Двухфазное короткое замыкание

Рассмотрим случай двухфазного КЗ через переходное сопротивление между поврежденными фазами. Предположим, что КЗ произошло между фазами В и С. На рис.2.5 показана схема замещения для поврежденных фаз линии при двухфазном КЗ через переходное сопротивление R_{Π} .

Уравнение, составленное по петле КЗ для поврежденных фаз, согласно рис. 2.5 имеет следующий вид

$$\underline{U}_B - \underline{U}_C = (\underline{I}_B - \underline{I}_C) \cdot \underline{Z} + \Delta \underline{U}_R, \quad (2.30)$$

где $\Delta \underline{U}_R$ – падение напряжения на переходном сопротивлении:

$$\Delta \underline{U}_R = (\underline{I}_R^{C1} + \underline{I}_R^{C2}) \cdot R_{\Pi}. \quad (2.31)$$

Следует отметить, что ток нагрузки $\underline{I}_{\text{НАГР}}$ (рис.2.5) не будет проходить через переходное сопротивление, так как

$$\begin{aligned}
\underline{I}_R^{C1} + \underline{I}_R^{C2} &= \underline{I}_B - \underline{I}_C + \underline{I}_B^{C2} - \underline{I}_C^{C2} = (\underline{I}_{B1} + \underline{I}_{B2} + \underline{I}_{\text{ВНАГР}}) - (\underline{I}_{C1} + \underline{I}_{C2} + \\
&+ \underline{I}_{\text{СНАГР}}) + (\underline{I}_{B1}^{C2} + \underline{I}_{B2}^{C2} - \underline{I}_{\text{ВНАГР}}^{C2}) - (\underline{I}_{C1}^{C2} + \underline{I}_{C2}^{C2} - \underline{I}_{\text{СНАГР}}^{C2}) =, \\
&= (\underline{I}_{B1} + \underline{I}_{B2}) - (\underline{I}_{C1} + \underline{I}_{C2}) + (\underline{I}_{B1}^{C2} + \underline{I}_{B2}^{C2}) - (\underline{I}_{C1}^{C2} + \underline{I}_{C2}^{C2})
\end{aligned} \quad (2.32)$$

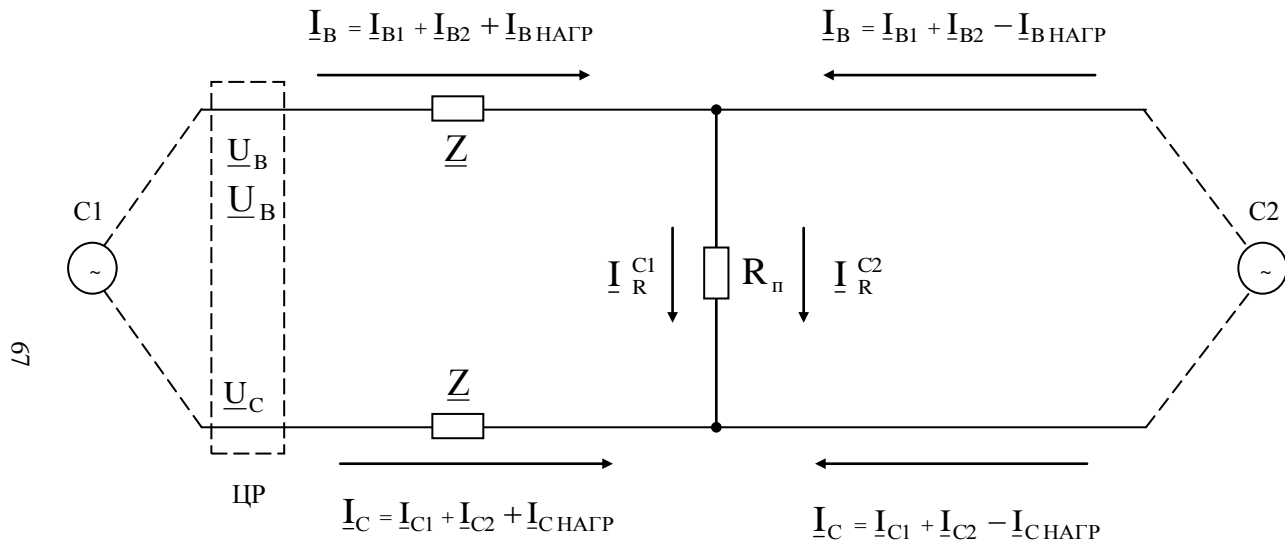


Рис. 2.5 – Схема замещения поврежденных фаз линии при двухфазном КЗ

где $\underline{I}_{B1}, \underline{I}_{B2}, \underline{I}_{C1}, \underline{I}_{C2}, \underline{I}_{B1}^{C2}, \underline{I}_{B2}^{C2}, \underline{I}_{C1}^{C2}, \underline{I}_{C2}^{C2}$ – токи прямой и обратной последовательности поврежденных фаз от системы C1 и системы C2 соответственно;

$\underline{I}_{ВНАГР}, \underline{I}_{СНАГР}$ – токи нагрузки поврежденных фаз.

Представим уравнение (2.30) в следующем виде:

$$\underline{U} = \underline{I} \cdot \underline{Z} + \underline{I}_R \cdot R_{\Pi}, \quad (2.33)$$

где $\underline{U} = \underline{U}_B - \underline{U}_C$ – разность напряжений поврежденных фаз;

$\underline{I} = \underline{I}_B - \underline{I}_C$ – разность токов поврежденных фаз;

$\underline{I}_R = \underline{I}_R^{C1} + \underline{I}_R^{C2}$ – ток КЗ через переходное сопротивление.

В виде системы двух вещественных уравнений выражение (2.33) имеет вид

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{Re}(\underline{U}) &= \operatorname{Re}(\underline{I}) \cdot \underline{r} - \operatorname{Im}(\underline{I}) \cdot X + \operatorname{Re}(\underline{I}_R) \cdot R_{\Pi} \\ \operatorname{Im}(\underline{U}) &= \operatorname{Re}(\underline{I}) \cdot X + \operatorname{Im}(\underline{I}) \cdot \underline{r} + \operatorname{Im}(\underline{I}_R) \cdot R_{\Pi} \end{aligned} \right\}. \quad (2.34)$$

Введем коэффициент связи

$$K_R = \frac{\underline{r}}{X}, \quad (2.35)$$

тогда система (2.34) примет вид

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{Re}(U) &= [\operatorname{Re}(I) \cdot K_R - \operatorname{Im}(I)] \cdot X + \operatorname{Re}(I_R) \cdot R_{\Pi} \\ \operatorname{Im}(U) &= [\operatorname{Re}(I) + \operatorname{Im}(I) \cdot K_R] \cdot X + \operatorname{Im}(I_R) \cdot R_{\Pi} \end{aligned} \right\}. \quad (2.36)$$

Исключая величину R_{Π} в уравнении (2.36), решим его относительно реактивного сопротивления искомого участка линии X :

$$X = \frac{\operatorname{Re}(U) - \operatorname{Im}(U) \cdot \operatorname{ctg} \varphi_R}{\operatorname{Re}(I) \cdot (K_R - \operatorname{ctg} \varphi_R) - \operatorname{Im}(I) \cdot (1 + K_R \cdot \operatorname{ctg} \varphi_R)}, \quad (2.37)$$

где $\text{ctg}\varphi_R = \frac{\text{Re}(\underline{I}_R)}{\text{Im}(\underline{I}_R)}$ – котангенс треугольника тока КЗ.

В формуле (2.37) известны все составляющие, кроме величины $\text{ctg}\varphi_R$, для которой информация определена недостаточно. Запишем $\text{ctg}\varphi_R$ с учетом (2.32) следующим образом:

$$\text{ctg}\varphi_R = \frac{\text{Re}(\underline{I}_B) - \text{Re}(\underline{I}_C) + \text{Re}(\underline{I}_B^{C2}) - \text{Re}(\underline{I}_C^{C2})}{\text{Im}(\underline{I}_B) - \text{Im}(\underline{I}_C) + \text{Im}(\underline{I}_B^{C2}) - \text{Im}(\underline{I}_C^{C2})}. \quad (2.38)$$

Согласно классическому представлению двухфазного КЗ [105] ток в особой фазе (в нашем случае фазы А) в месте КЗ равен нулю (рис.2.6):

$$\underline{I}_{RA} = \underline{I}_{RA1} + \underline{I}_{RA2} = 0. \quad (2.39)$$

Для токов двухфазного КЗ можно выполнить преобразование выражения (2.38), учитывая соотношения между симметричными составляющими разных фаз (рис.2.6). При этом суммарный ток двухфазного КЗ равен

$$\underline{I}_R = (\underline{I}_{R1B} + \underline{I}_{R2B}) - (\underline{I}_{R1C} + \underline{I}_{R2C}) = 2 \cdot \sqrt{3} \cdot \underline{I}_{R2A} \angle (\varphi_{A2} + 90^\circ). \quad (2.40)$$

С учетом (2.40) выражение (3.38) примет вид

$$\text{ctg}\varphi_R = \frac{\underline{I}_R \cdot \cos\varphi_R}{\underline{I}_R \cdot \sin\varphi_R} = \frac{\cos(\varphi_{A2} + 90^\circ)}{\sin(\varphi_{A2} + 90^\circ)} = \frac{\sin\varphi_{A2}}{\cos\varphi_{A2}} = -\text{tg}\varphi_{A2}. \quad (2.41)$$

Принимая во внимание (2.41), уравнение (2.37) можем записать следующим образом:

$$X = \frac{\text{Re}(\underline{U}) + \text{Im}(\underline{U}) \cdot \text{tg}\varphi_{A2}}{\text{Re}(\underline{I}) \cdot (K_R + \text{tg}\varphi_{A2}) + \text{Im}(\underline{I}) \cdot (K_R \cdot \text{tg}\varphi_{A2} - 1)}, \quad (2.42)$$

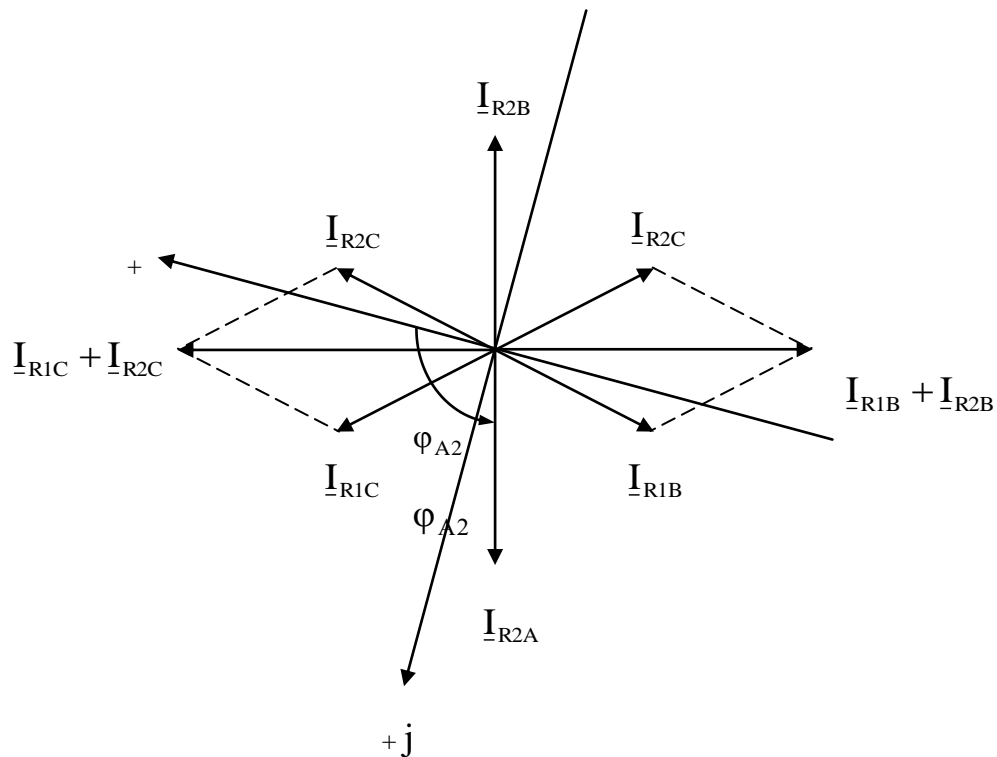


Рис. 2.6 – Симметричные составляющие токов через дугу при двухфазном КЗ

где

$$\operatorname{tg}\varphi_{A2} = \frac{\operatorname{Im}(\underline{I}_{A2}) - \operatorname{Im}(\underline{I}_{A2}^{C2})}{\operatorname{Re}(\underline{I}_{A2}) - \operatorname{Re}(\underline{I}_{A2}^{C2})}; \quad (2.43)$$

$\operatorname{Re}(\underline{I}_{A2})$, $\operatorname{Im}(\underline{I}_{A2})$ – вещественная и мнимая составляющие тока обратной последовательности особой фазы от системы C1;

$\operatorname{Re}(\underline{I}_{A2}^{C2})$, $\operatorname{Im}(\underline{I}_{A2}^{C2})$ – вещественная и мнимая составляющие тока обратной последовательности особой фазы от системы C2.

Если допустить, что \underline{I}_{A2} и \underline{I}_{A2}^{C2} имеют близкие по величине фазовые значения ($\varphi_{A2} = \varphi_{A2}^{C2}$) и учесть, что токи нагрузки не оказывают влияния на расчет (2.32), формула (2.42) полностью определена при замере с одной стороны в допущении, что:

$$\operatorname{tg}\varphi_{A2} \approx \frac{\operatorname{Im}(\underline{I}_{A2})}{\operatorname{Re}(\underline{I}_{A2})}. \quad (2.44)$$

На основании сделанных выкладок можно предложить расчетное выражение для определения расстояния до места повреждения при двухфазном КЗ по ПАР одного из питающих концов линии в сетях с эффективно заземленной нейтралью:

$$L_X = \frac{\operatorname{Re}(\underline{U}) + \operatorname{Im}(\underline{U}) \cdot \operatorname{tg}\varphi_{\text{оф}2}}{\operatorname{Re}(\underline{I}) \cdot (K_R + \operatorname{tg}\varphi_{\text{оф}2}) + \operatorname{Im}(\underline{I}) \cdot (K_R \cdot \operatorname{tg}\varphi_{\text{оф}2} - 1)} \cdot \frac{1}{X_{\text{уд}}}, \quad (2.45)$$

где L_X – расстояние до места повреждения;

$X_{\text{уд}}$ – удельное реактивное сопротивление линии;

\underline{U} – разность напряжений поврежденных фаз;

\underline{I} – разность токов поврежденных фаз;

$\operatorname{tg}\varphi_{\text{оф}2}$ – тангенс тока особой фазы;

K_R – коэффициент связи.

2.3 Трехфазное короткое замыкание

Рассмотрим случай трехфазного КЗ через переходное сопротивление. Схема замещения фазы линии при трехфазном КЗ через пере-

ходное сопротивление показана на рис.2.7.

Уравнение, составленное по петле КЗ для одной фазы, имеет следующий вид:

$$\underline{U}_{\phi} = \underline{I}_{\phi} \cdot \underline{Z} + (\underline{I}_{\phi} + \underline{I}_{\phi}^{C2}) \cdot R_{\pi}, \quad (2.46)$$

где \underline{U}_{ϕ} – фазное напряжение в месте замера;

\underline{I}_{ϕ} – фазный ток КЗ со стороны замера;

$\underline{I}_{\phi}^{C2}$ – фазный ток КЗ от системы C2;

\underline{Z} – сопротивление искомого участка линии;

R_{π} – переходное сопротивление.

Уравнение (2.46) в виде системы двух вещественных уравнений имеет вид

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{Re}(\underline{U}_{\phi}) &= \operatorname{Re}(\underline{I}_{\phi}) \cdot \underline{r} - \operatorname{Im}(\underline{I}_{\phi}) \cdot \underline{X} + [\operatorname{Re}(\underline{I}_{\phi}) + \operatorname{Re}(\underline{I}_{\phi}^{C2})] \cdot R_{\pi} \\ \operatorname{Im}(\underline{U}_{\phi}) &= \operatorname{Im}(\underline{I}_{\phi}) \cdot \underline{X} + \operatorname{Re}(\underline{I}_{\phi}) \cdot \underline{r} + [\operatorname{Im}(\underline{I}_{\phi}) + \operatorname{Im}(\underline{I}_{\phi}^{C2})] \cdot R_{\pi} \end{aligned} \right\}, \quad (2.47)$$

где r и x – активное и реактивное сопротивления линии.

C коэффициентом связи

$$K_R = \frac{r}{X} \quad (2.48)$$

уравнение (2.47) можно записать следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{Re}(\underline{U}_{\phi}) &= [\operatorname{Re}(\underline{I}_{\phi}) \cdot K_R - \operatorname{Im}(\underline{I}_{\phi})] \cdot \underline{X} + \operatorname{Re}(\underline{I}_K) \cdot R_{\pi} \\ \operatorname{Im}(\underline{U}_{\phi}) &= [\operatorname{Im}(\underline{I}_{\phi}) + \operatorname{Re}(\underline{I}_{\phi}) \cdot K_R] \cdot \underline{X} + \operatorname{Im}(\underline{I}_K) \cdot R_{\pi} \end{aligned} \right\}, \quad (2.49)$$

где $\operatorname{Re}(\underline{I}_K) = \operatorname{Re}(\underline{I}_{\phi}) + \operatorname{Re}(\underline{I}_{\phi}^{C2})$; $\operatorname{Im}(\underline{I}_K) = \operatorname{Im}(\underline{I}_{\phi}) + \operatorname{Im}(\underline{I}_{\phi}^{C2})$.

Решение уравнения (2.49) относительно реактивного сопротивления искомого участка линии X , можно представить в следующем виде:

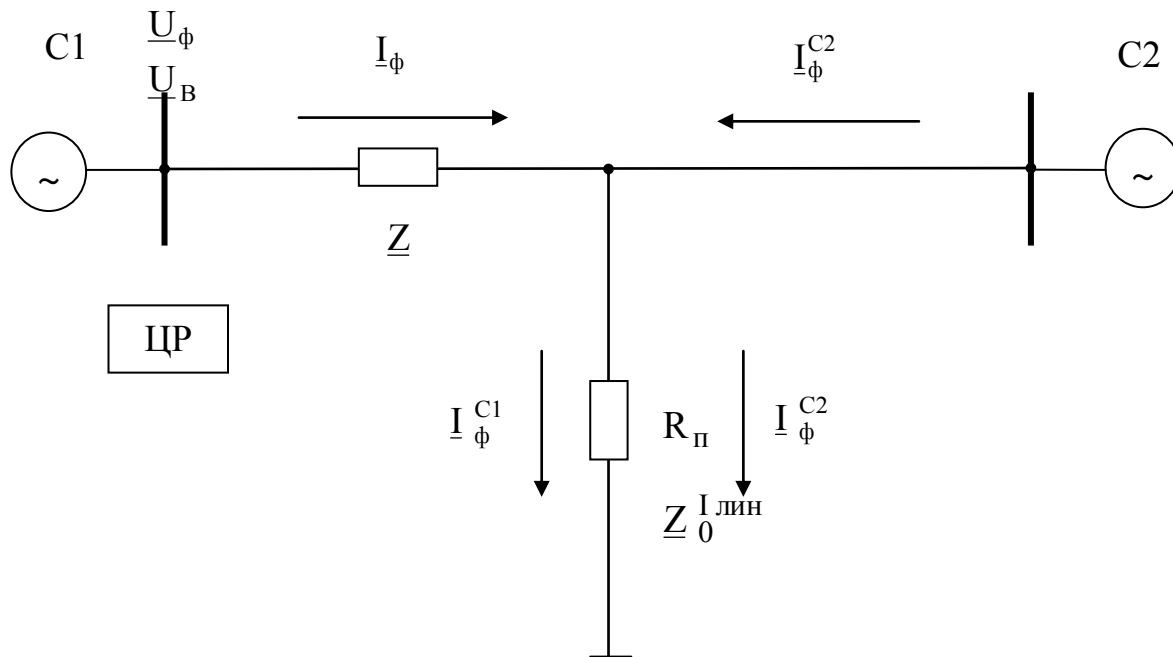


Рис. 2.7— Схема замещения фазы линии при трехфазном КЗ через переходное сопротивление

$$X = \frac{\operatorname{Re}(\underline{U}_{\Phi}) - \operatorname{Im}(\underline{U}_{\Phi}) \cdot \operatorname{ctg} \varphi_K}{\operatorname{Re}(\underline{I}_{\Phi}) \cdot (K_R - \operatorname{ctg} \varphi_K) - \operatorname{Im}(\underline{I}_{\Phi}) \cdot (1 + K_R \cdot \operatorname{ctg} \varphi_K)}, \quad (2.50)$$

где

$$\operatorname{ctg} \varphi_K = \frac{\operatorname{Re}(\underline{I}_K)}{\operatorname{Im}(\underline{I}_K)} = \frac{\operatorname{Re}(\underline{I}_{\Phi}) + \operatorname{Re}(\underline{I}_{\Phi}^{C2})}{\operatorname{Im}(\underline{I}_{\Phi}) + \operatorname{Im}(\underline{I}_{\Phi}^{C2})}. \quad (2.51)$$

При допущении равенства фаз токов \underline{I}_{Φ} и $\underline{I}_{\Phi}^{C2}$:

$$\operatorname{ctg} \varphi_K \approx \frac{\operatorname{Re}(\underline{I}_{\Phi})}{\operatorname{Im}(\underline{I}_{\Phi})}. \quad (2.52)$$

Принимая во внимание (2.52), преобразуем уравнение (2.50) следующим образом:

$$\begin{aligned} X &= \frac{\operatorname{Re}(\underline{U}_{\Phi}) - \operatorname{Im}(\underline{U}_{\Phi}) \cdot \frac{\operatorname{Re}(\underline{I}_{\Phi})}{\operatorname{Im}(\underline{I}_{\Phi})}}{\operatorname{Re}(\underline{I}_{\Phi}) \cdot \left[K_R - \frac{\operatorname{Re}(\underline{I}_{\Phi})}{\operatorname{Im}(\underline{I}_{\Phi})} \right] - \operatorname{Im}(\underline{I}_{\Phi}) \cdot \left[1 + K_R \cdot \frac{\operatorname{Re}(\underline{I}_{\Phi})}{\operatorname{Im}(\underline{I}_{\Phi})} \right]} = \\ &= - \frac{\operatorname{Re}(\underline{U}_{\Phi}) \cdot \operatorname{Im}(\underline{I}_{\Phi}) - \operatorname{Im}(\underline{U}_{\Phi}) \cdot \operatorname{Re}(\underline{I}_{\Phi})}{(\underline{I}_{\Phi})^2}. \end{aligned} \quad (2.53)$$

Если выбрать вещественную ось, совпадающую по направлению с \underline{U}_{Φ} , то уравнение (2.53) можно упростить:

$$X = - \frac{U_{\Phi} \cdot \sin \alpha}{I_{\Phi}}, \quad (2.54)$$

где α – аргумент тока \underline{I}_{Φ} .

Так как для индуктивной цепи $\alpha = -\varphi_{\Phi}$, где φ_{Φ} – угол между напряжением и током одноименной фазы, выражение (2.54) примет вид

$$X = \frac{U_{\Phi} \cdot \sin \varphi_{\Phi}}{I_{\Phi}}. \quad (2.55)$$

Расчетное выражение для определения расстояния до места повреждения при трехфазном КЗ по ПАР одного из питающих концов линии в сетях с эффективно заземленной нейтралью имеет вид

$$L_X = \frac{U_{\Phi} \cdot \sin \varphi_{\Phi}}{I_{\Phi} \cdot X_{уд}}, \quad (2.56)$$

где U_{Φ} – модуль фазного напряжения;

I_{Φ} – модуль фазного тока;

$X_{уд}$ – удельное реактивное сопротивление линии.

При замере с одной стороны целесообразно выполнять расчет для каждой фазы, а расстояние до места повреждения брать как среднее арифметическое.

3 МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАССТОЯНИЯ ДО МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ

Полученные в разделе 2 выражения позволяют производить одностороннее определение расстояния до места повреждения. Однако точность результатов при двустороннем питании поврежденной линии будет зависеть от влияния системы с противоположного замера конца линии С2.

Сопротивление связи с системой определяется прежде всего схемой сети, которая имеет относительную стабильность. Использование цифровых регистраторов на базе ЭВМ [63-68] позволяет производить оценку связи с системой С2 при КЗ “за спиной”. Полученные путем расчета параметры С2 могут сохраняться в памяти ЭВМ до момента КЗ на линии, а затем использоваться для уточнения расчета по определению расстояния до места повреждения с указанием даты и времени оценки связи с системой. В качестве параметров системы С2 выступают сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательностей, а также ЭДС прямой последовательности.

3.1 Расчет параметров системы С2

При повреждениях в системе С1 через линию проходят токи КЗ от системы С2 (рис.3.1).

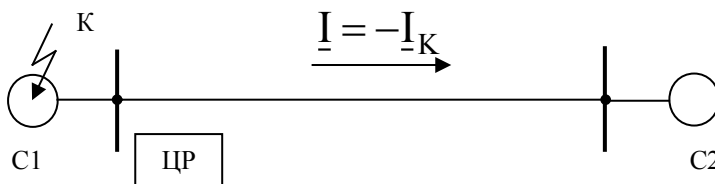


Рис.3.1 – КЗ внутри системы С1

Напряжение нулевой последовательности в месте замера для **одноцепной линии**, согласно схеме замещения нулевой последовательности линии, показанной на рис.3.2, равно

$$\underline{U}_{\Phi 0} = \underline{I}_0 \cdot \underline{Z}_0^{C2} + \underline{I}_0 \cdot \underline{Z}_{0Л}. \quad (3.1)$$

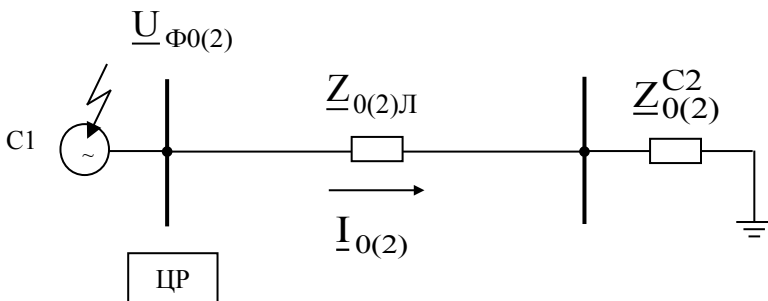


Рис.3.2 – Схема замещения нулевой (обратной) последовательности одноцепной линии.

Так как схемы замещения нулевой и обратной последовательностей одноцепной линии отличаются количественно (рис.3.2), напряжение обратной последовательности аналогично (3.1) равно

$$\underline{U}_{\Phi 2} = I_2 \cdot Z_2^{C2} + I_2 \cdot Z_{2Л}. \quad (3.2)$$

Сопротивления системы C2 нулевой и обратной последовательностей соответственно равны

$$Z_0^{C2} = \frac{\underline{U}_{\Phi 0}}{I_0} - Z_{0Л}; \quad (3.3)$$

$$Z_2^{C2} = \frac{\underline{U}_{\Phi 2}}{I_2} - Z_{2Л}. \quad (3.4)$$

Для прямой последовательности схема замещения одноцепной линии отличается наличием ЭДС \underline{E}^{C2} (рис.3.3).

Напряжение прямой последовательности в месте замера равно

$$\underline{U}_{\Phi 1} = \underline{E}^{C2} + I_1 \cdot (Z_{1Л} + Z_1^{C2}). \quad (3.5)$$

Уравнение (3.5) можно приближенно решить относительно \underline{E}^{C2} , если допустить, что $Z_1^{C2} \approx Z_2^{C2}$:

$$\underline{E}^{C2} \approx \underline{U}_{\Phi 1} - I_1 \cdot (Z_{1Л} + Z_2^{C2}). \quad (3.6)$$

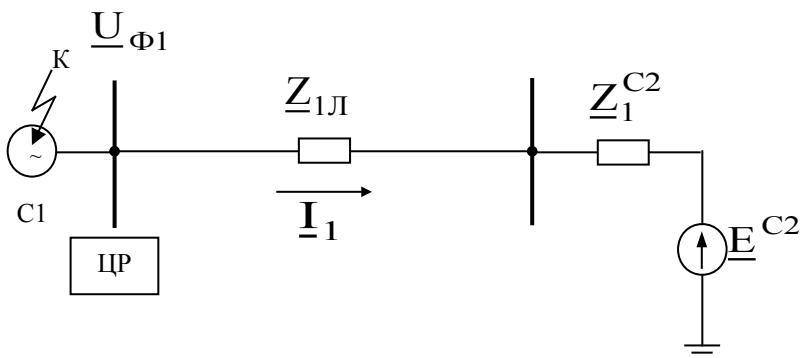


Рис.3.3 – Схема замещения прямой последовательности одноцепной линии

Рассмотрим теперь **двухцепную линию**, схема замещения нулевой и обратной последовательностей которой показана на рис.3.4.

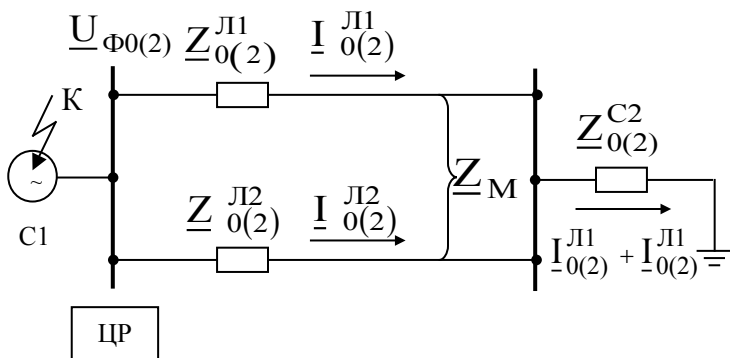


Рис.3.4 – Схема замещения нулевой и обратной последовательностей двухцепной линии

Напряжения нулевой последовательности в месте замера

$$\underline{U}_{\Phi 0} = \underline{I}_0^I \cdot \underline{Z}_{0Л} + \underline{I}_0^{\Pi} \cdot \underline{Z}_M + (\underline{I}_0^I + \underline{I}_0^{\Pi}) \cdot \underline{Z}_0^{C2}, \quad (3.7)$$

при $\underline{I}_0^I = \underline{I}_0^{\Pi}$

$$\underline{U}_{\Phi 0} = \underline{I}_0 \cdot (\underline{Z}_{0Л} + \underline{Z}_M + 2 \cdot \underline{Z}_0^{C2}). \quad (3.8)$$

Напряжения обратной последовательности в месте замера

$$\underline{U}_{\Phi 2} = \underline{I}_2 \cdot (\underline{Z}_{2Л} + 2 \cdot \underline{Z}_2^{C2}). \quad (3.9)$$

Сопротивление нулевой последовательности системы C2 для двухцепной линии

$$\underline{Z}_0^{C2} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\underline{U}_{\Phi 0}}{\underline{I}_0} - \underline{Z}_{0Л} - \underline{Z}_M \right). \quad (3.10)$$

Сопротивление обратной последовательности системы C2 для двухцепной линии

$$\underline{Z}_2^{C2} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\underline{U}_{\Phi 2}}{\underline{I}_2} - \underline{Z}_{2Л} \right). \quad (3.11)$$

Напряжение прямой последовательности в месте замера (рис.3.5)

$$\underline{U}_{\Phi 1} - \underline{E}^{C2} = \underline{I}_1 \cdot (\underline{Z}_{1Л} + 2 \cdot \underline{Z}_1^{C2}), \quad (3.12)$$

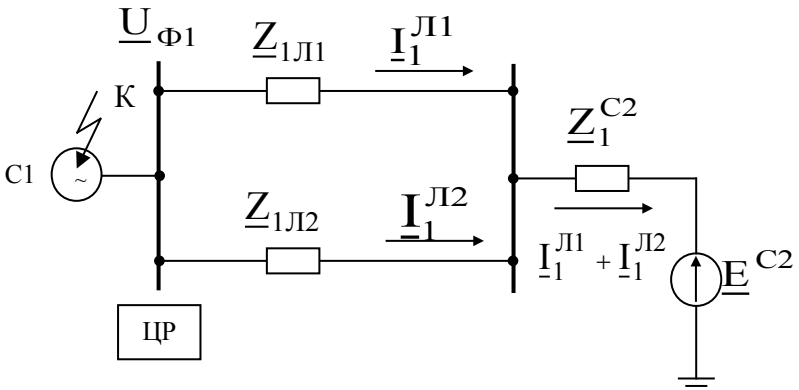


Рис.3.5 – Схема замещения прямой последовательности двухцепной

линии

откуда ЭДС прямой последовательности при допущении, что $\underline{Z}_1^{C2} \approx \underline{Z}_2^{C2}$:

$$\underline{E}^{C2} \approx \underline{U}_{\Phi 1} - \underline{I}_1 \cdot (\underline{Z}_{1Л} + 2 \cdot \underline{Z}_2^{C2}). \quad (3.13)$$

3.2 Расчет токов короткого замыкания от системы C2

Для **одноцепной линии** согласно схеме замещения нулевой и обратной последовательностей, изображенной на рис.3.6, токи нулевой и обратной последовательностей от системы C2 при КЗ на линии можно получить из уравнений

$$\underline{U}_{\Phi 0} - \underline{I}_0 \cdot \underline{Z}_{0л} = -\underline{I}_0^{C2} \cdot (\underline{Z}_{0(L-l)} + \underline{Z}_0^{C2}); \quad (3.14)$$

$$\underline{U}_{\Phi 2} - \underline{I}_2 \cdot \underline{Z}_{2л} = -\underline{I}_2^{C2} \cdot (\underline{Z}_{2(L-l)} + \underline{Z}_2^{C2}). \quad (3.15)$$

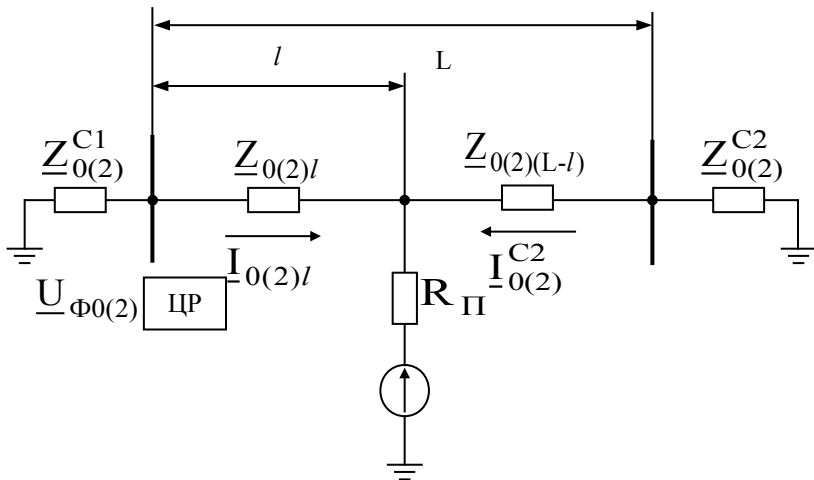


Рис.3.6 – Схема замещения нулевой и обратной последовательностей при КЗ на одноцепной линии

Ток нулевой последовательности от системы С2:

$$\underline{I}_0^{C2} = \frac{\underline{I}_0 \cdot \underline{Z}_{0l} - \underline{U}_{\Phi 0}}{\underline{Z}_{0(L-l)} + \underline{Z}_0^{C2}}, \quad (3.16)$$

ток обратной последовательности

$$\underline{I}_2^{C2} = \frac{\underline{I}_2 \cdot \underline{Z}_{2l} - \underline{U}_{\Phi 2}}{\underline{Z}_{2(L-l)} + \underline{Z}_2^{C2}}, \quad (3.17)$$

где \underline{I}_0 и \underline{I}_2 – соответственно ток нулевой и обратной последовательности в месте замера;

$\underline{U}_{\Phi 0}$ и $\underline{U}_{\Phi 2}$ – фазные напряжения нулевой и обратной последовательностей в месте замера;

\underline{Z}_{0l} и \underline{Z}_{2l} – сопротивления нулевой и обратной последовательностей от места замера до места повреждения;

$\underline{Z}_{0(L-l)}$ и $\underline{Z}_{2(L-l)}$ – сопротивления нулевой и обратной последовательностей от места повреждения до противоположного замера конца линии.

Ток прямой последовательности от системы С2, согласно схеме замещения прямой последовательности, показанной на рис.3.7, можно получить из уравнения

$$\underline{U}_{\Phi 1} - \underline{I}_{1l} \cdot \underline{Z}_{1l} = \underline{E}^{C2} - \underline{I}_1^{C2} \cdot (\underline{Z}_{1(L-l)} + \underline{Z}_1^{C2}) \quad (3.18)$$

следующим образом:

$$\underline{I}_1^{C2} = \frac{\underline{E}^{C2} - \underline{U}_{\Phi 1} + \underline{I}_{1l} \cdot \underline{Z}_{1l}}{\underline{Z}_{1(L-l)} + \underline{Z}_1^{C2}}, \quad (3.19)$$

при допущении, что $\underline{Z}_1^{C2} \approx \underline{Z}_2^{C2}$, уравнение (3.19) примет следующий вид:

$$\underline{I}_1^{C2} = \frac{\underline{E}^{C2} - \underline{U}_{\Phi 1} + \underline{I}_{1l} \cdot \underline{Z}_{1l}}{\underline{Z}_{1(L-l)} + \underline{Z}_2^{C2}}, \quad (3.20)$$

где \underline{E}^{C2} – ЭДС прямой последовательности от системы C2.

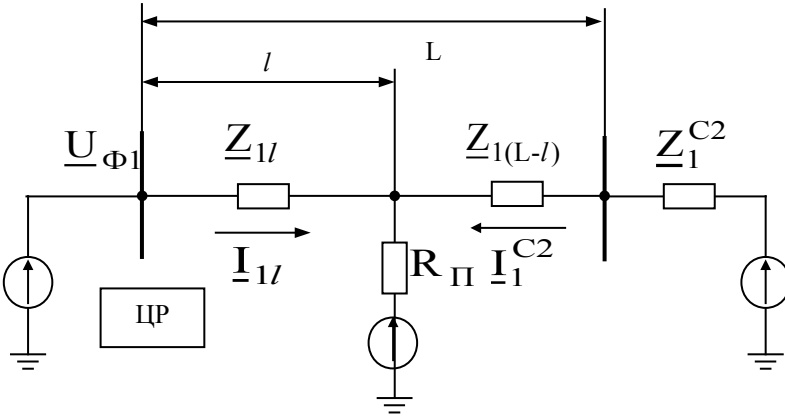


Рис.3.7 – Схема замещения прямой последовательности при КЗ на одноцепной линии

Для **двухцепной линии** ток нулевой последовательности от системы C2 согласно схеме замещения нулевой последовательности двухцепной линии при КЗ на одной из линий (рис.3.8), определяем из уравнения

$$\underline{U}_{\Phi 0} - \underline{I}_0^I \cdot \underline{Z}_{0l} - \underline{I}_0^{II} \cdot \underline{Z}_{Ml} = -\underline{I}_0^{II} \cdot \underline{Z}_{0(L-l)} + \underline{I}_0^{II} \cdot \underline{Z}_{M(L-l)} - \underline{I}_0^{C2} \cdot \underline{Z}_{0(L-l)} - \underline{I}_0^{C2} \cdot \underline{Z}_0^{C2}, \quad (3.21)$$

следующим образом:

$$\underline{I}_0^{C2} = \frac{\underline{I}_0^I \cdot \underline{Z}_{0l} + \underline{I}_0^{II} \cdot \underline{Z}_{ML} - \underline{I}_0^{II} \cdot \underline{Z}_{0(L-l)} - \underline{U}_{\Phi 0}}{\underline{Z}_{0(L-l)} + \underline{Z}_0^{C2}}. \quad (3.22)$$

Отличие схем замещений обратной и нулевой последовательностей заключается в наличии сопротивления \underline{Z}_M в схеме замещения нулевой последовательности, поэтому выражение для тока обратной последовательности от системы C2 имеет следующий вид:

$$\underline{I}_2^{C2} = \frac{\underline{I}_2^I \cdot \underline{Z}_{2l} - \underline{I}_2^{II} \cdot \underline{Z}_{2(L-l)} - \underline{U}_{\Phi 2}}{\underline{Z}_{2(L-l)} + \underline{Z}_2^{C2}}. \quad (3.23)$$

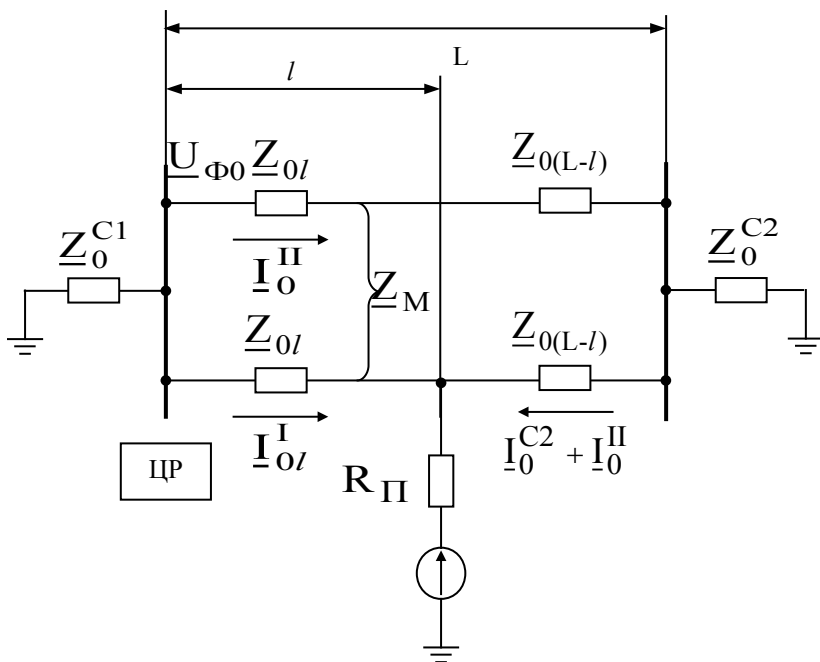


Рис.3.8 – Схема замещения нулевой последовательности двухцепной линии

Ток прямой последовательности от системы С2 согласно схеме замещения прямой последовательности двухцепной линии при КЗ на одной из линий (рис 3.9) определяем из уравнения

$$\underline{U}_{\Phi 1} - \underline{I}_1^I \cdot \underline{Z}_{1l} = \underline{E}^{C2} - \underline{I}_1^{C2} \cdot \underline{Z}_1^{C2} - (\underline{I}_1^{C2} + \underline{I}_1^{\Pi}) \cdot \underline{Z}_{1(L-l)} \quad (3.24)$$

следующим образом:

$$\underline{I}_1^{C2} = \frac{\underline{E}^{C2} - \underline{U}_{\Phi 1} + \underline{I}_1^I \cdot \underline{Z}_{1l} - \underline{I}_1^{\Pi} \cdot \underline{Z}_{1(L-l)}}{\underline{Z}_{1(L-l)} + \underline{Z}_1^{C2}}. \quad (3.25)$$

При допущении, что $\underline{Z}_1^{C2} \approx \underline{Z}_2^{C2}$, выражение (3.25) примет следующий вид:

$$\underline{I}_1^{C2} = \frac{\underline{E}^{C2} - \underline{U}_{\Phi 1} + \underline{I}_1^I \cdot \underline{Z}_{1l} - \underline{I}_1^{II} \cdot \underline{Z}_{1(L-l)}}{\underline{Z}_{1(L-l)} + \underline{Z}_2^{C2}}. \quad (3.26)$$

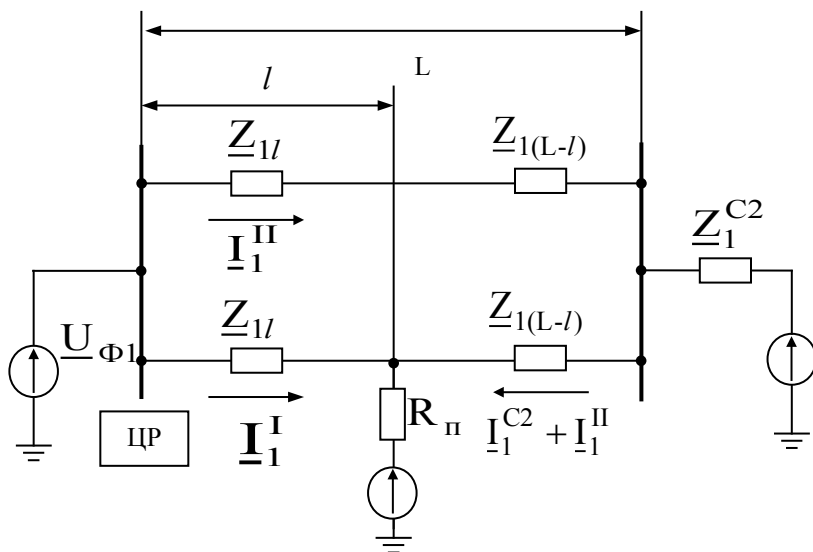


Рис.3.9 – Схема замещения прямой последовательности двухцепной линии

3.3 Алгоритм определения расстояния до места повреждения

На основании полученных расчетных выражений для определения расстояния до места повреждения при однофазном, двухфазном и трехфазном КЗ, а также расчетных выражений для определения параметров системы C2 представляется возможным создание алгоритма определения расстояния до места при двухстороннем питании поврежденной линии в два этапа. Первым этапом является предварительный расчет расстояния до места повреждения, без учета влияния системы C2. Второй этап – уточненный расчет расстояния до места повреждения, с учетом влияния системы C2. Причем во время второго этапа уточненный расчет производится столько раз, сколько имеется записей параметров системы C2. Особенностью уточненного расчета является

то, что уточнение расстояния до места повреждения будет иметь место только в том случае, когда режим работы энергосистемы в момент КЗ будет близок к режиму работы энергосистемы на тот момент времени, на который производится уточнение. В противном случае, уточненный расчет может дать результат с большей погрешностью, чем предварительный. Оценку результата уточненного расчета должен производить квалифицированный специалист-энергетик, который может выбрать из совокупности полученных результатов уточнения соответствующий по режиму.

Расчет в два этапа необходимо производить только для поврежденных линий с двухсторонним питанием при наличии информации о параметрах системы С2. В противном случае, когда отсутствует информация о параметрах системы С2 или поврежденная линия имеет одностороннее питание необходимо производить только предварительный расчет.

Рассмотрим возможность выполнения уточненного расчета на примере однофазного КЗ на одноцепной линии с ответвлением в случае КЗ до ответвления. Расчетное выражение для уточненного определения расстояния до места повреждения с учетом (2.19) и (2.16) будет иметь следующий вид:

$$L_{КЗ} = \frac{\operatorname{Re}(\underline{U}_{\Phi}) - \operatorname{Im}(\underline{U}_{\Phi}) \cdot \frac{\operatorname{Re}(\underline{I}_0^I) + \operatorname{Re}(\underline{I}_0^{C2})}{\operatorname{Im}(\underline{I}_0^I) + \operatorname{Im}(\underline{I}_0^{C2})}}{\operatorname{Re}(\underline{I}_{\Sigma}) - \operatorname{Im}(\underline{I}_{\Sigma}) \cdot \frac{\operatorname{Re}(\underline{I}_0^I) + \operatorname{Re}(\underline{I}_0^{C2})}{\operatorname{Im}(\underline{I}_0^I) + \operatorname{Im}(\underline{I}_0^{C2})}} \cdot \frac{1}{X_{1 \text{ уд.}}} \quad (3.27)$$

Величина тока нулевой последовательности от системы С2 в выражении (3.27) согласно (3.16) будет определяться следующим образом:

$$\underline{I}_0^{C2} = \frac{\underline{I}_0^I \cdot Z_{0 \text{ уд.}} \cdot L_{КЗ} - \underline{U}_{\Phi 0}}{Z_{0 \text{ уд.}} \cdot (L - L_{КЗ}) + Z_0^{C2}}, \quad (3.28)$$

где L – длина линии до ответвления.

Из (3.27) и (3.28) видно, что выражение для уточненного определения расстояния до места повреждения является нелинейным уравнением и может быть представлено в общем виде как

$$L_{КЗ} = f(L_{КЗ}), \quad (3.29)$$

где $L_{кз}$ – расстояние до места повреждения.

Нетрудно показать, что расчетные выражения для уточненного определения расстояния до места повреждения при двухфазном и трехфазном КЗ в общем виде будут аналогичны (3.29).

Следовательно, для выполнения уточненного расчета необходимо решить нелинейное уравнение (3.29). Решение уравнения (3.29) можно осуществить с помощью приближенных методов решения нелинейных уравнений [108], в частности методом простой итерации. При этом в качестве начального приближения $L_{кз}^{(0)}$ целесообразно брать результат предварительного расчета расстояния до места повреждения $L_{кз}^{(0)} = L_{кз}^{предв}$. Сходимость уточненного расчета проверяем по следующим двум условиям:

$$\left| L_{кз}^{(i)} - L_{кз} \right| \leq \varepsilon, \quad (3.30)$$

где i – порядковый номер итерации;

$L_{кз}$ – точное решение;

ε – точность вычислений;

$$i \leq 1000. \quad (3.31)$$

Реализация алгоритма определения расстояния до места повреждения в два этапа показана на рис 3.10 в виде структурной схемы программно-аппаратного комплекса для контроля и анализа аварийных отключений линий, где ЦР – цифровой регистратор, предназначенный для фиксации мгновенных значений параметров аварийного режима, к которым относятся фазные напряжения шин ПС и фазные токи отходящих линий. Устройство расчета параметров аварийного режима (УРПАР) предназначено для обработки мгновенных значений токов и напряжения, зафиксированные ЦР, а также для подготовки и формирования исходных данных для устройства определения места повреждения (УОМП). Основными функциями УРПАР являются:

- выбор момента и интервала анализа аварийного режима;
- определение поврежденной линии;
- определение линий, для которых КЗ находится за спиной;
- определение вида КЗ;
- определение особой фазы;
- формирование параметров поврежденной линии;

- определение действующих значений токов и напряжений, а также их фазовых соотношений;



Рис. 3.10 – Структурная схема программно-аппаратного комплекса для определения расстояния до места повреждения

- определение симметричных составляющих токов и напряжений, а также их фазовых соотношений;
- определение гармонического состава токов и напряжений.

УОМП предназначено для расчета расстояния до места повреждения. Как видно из рис.3.10 в состав УОМП входят следующие основные блоки:

- блок определения места повреждения (БОМП) — предназначен для расчета расстояния до места повреждения;
- блок определения параметров системы С2 (БОПС) — предназначен для расчета параметров системы С2 для линий КЗ, у которых произошло "за спиной".

Другие блоки УОМП имеют вспомогательный характер и их назначение ясно из рис.3.10.

3.3.1 Блок определения места повреждения

БОМП включает в себя три работающих независимо алгоритма, предназначенные для расчета расстояния до места повреждения при однофазном, двухфазном и трехфазном КЗ. Укрупненная блок-схема БОМП показана на рис.3.11. Данными для БОМП являются:

- вид КЗ;
- параметры аварийного режима;
- параметры поврежденной линии.

В зависимости от вида КЗ выбирается соответствующий алгоритм расчета.

Однофазное КЗ. Основой для создания алгоритма одностороннего определения расстояния до места повреждения при однофазном КЗ на одноцепной и двухцепной линии с и без ответвлений послужили расчетные выражения (2.18) и (2.19) в которых величина $\operatorname{ctg}\varphi_K$ определяется по (2.16). На рис.3.12 приведена блок-схема алгоритма одностороннего определения расстояния до места повреждения при однофазном КЗ.

В качестве исходных данных рассматриваемого алгоритма выступают следующие величины:

- фазное напряжение поврежденной фазы \underline{U}_Φ ;
- напряжения прямой \underline{U}_1 , обратной \underline{U}_2 и нулевой \underline{U}_0 последовательностей поврежденной фазы;
- фазный ток поврежденной фазы \underline{I}_Φ ;

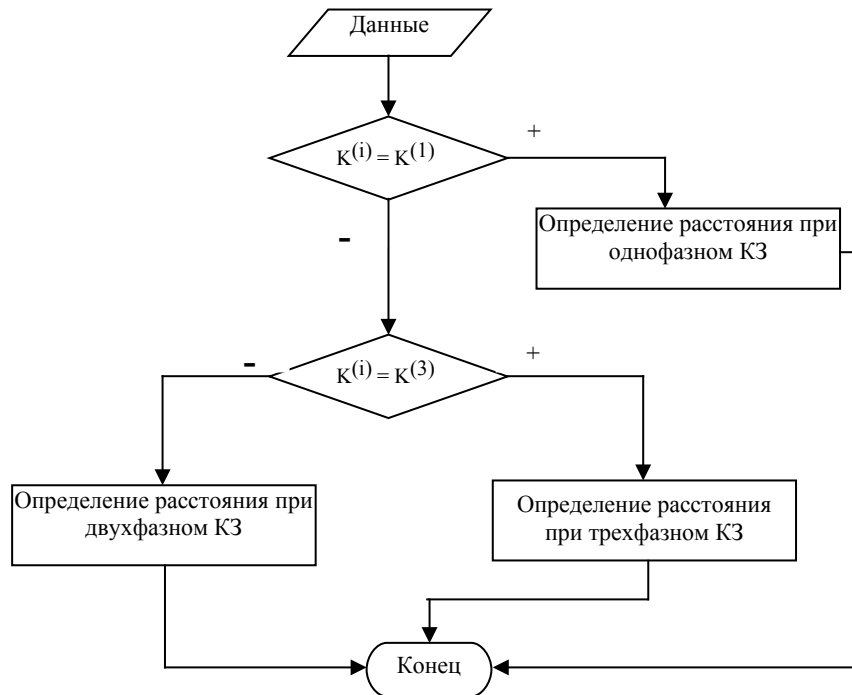


Рис. 3.11 – Блок схема БОМП

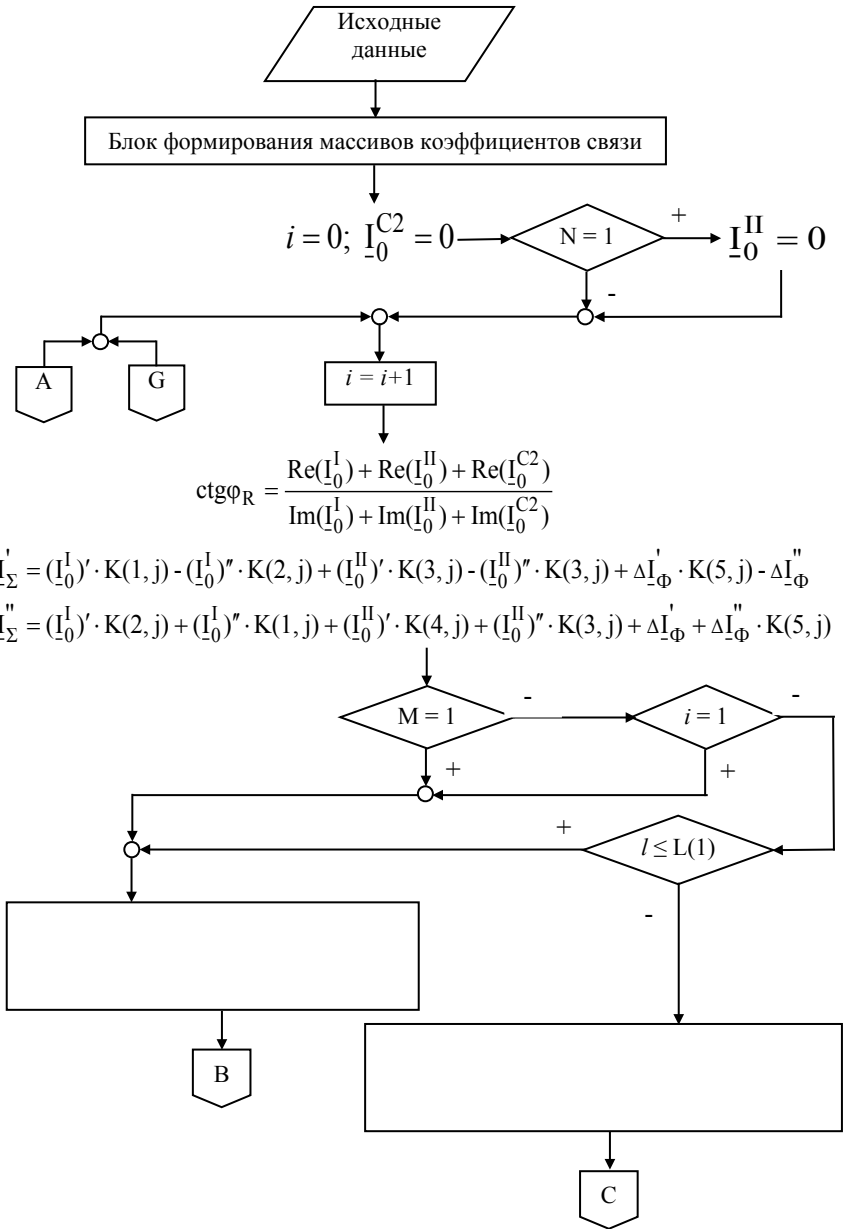
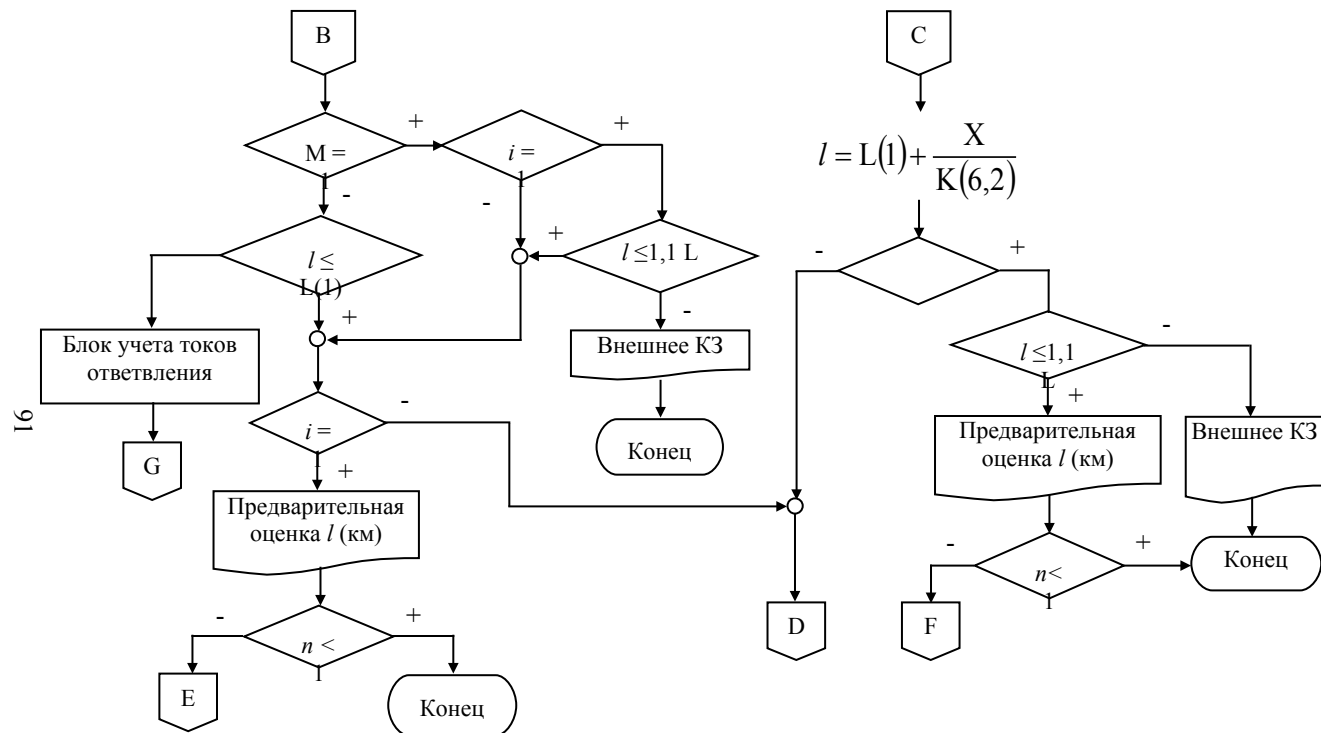
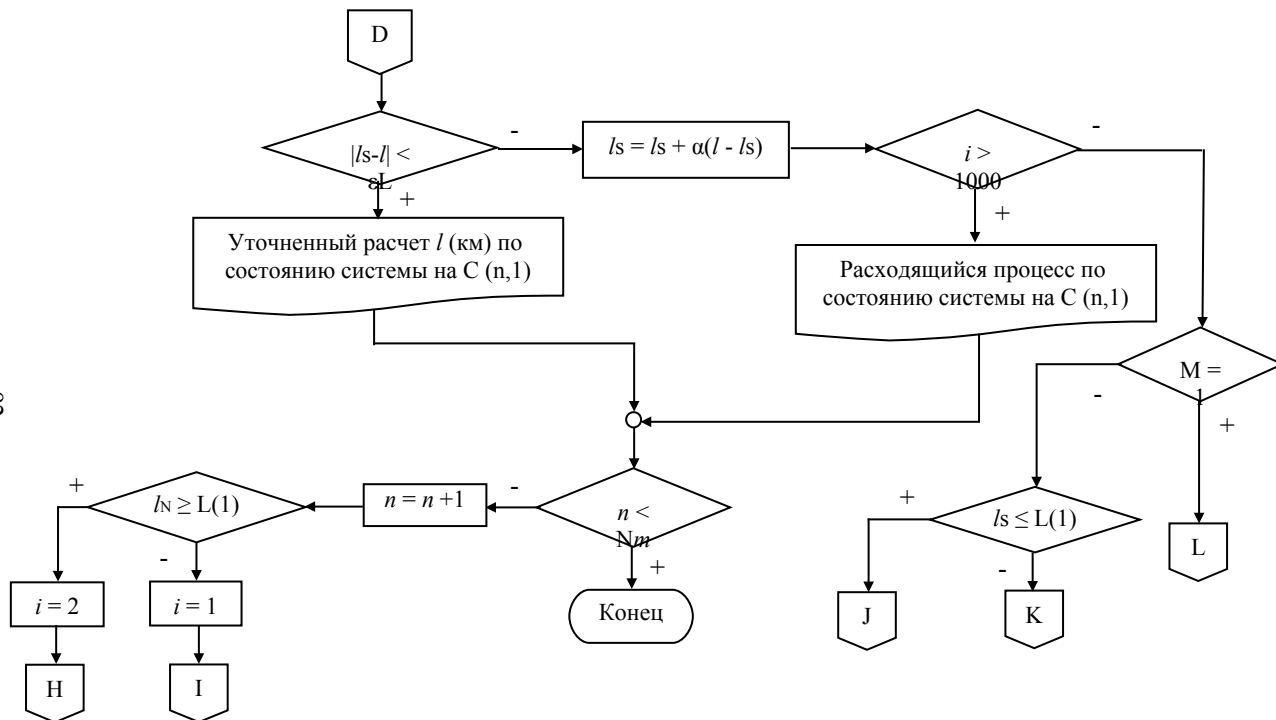
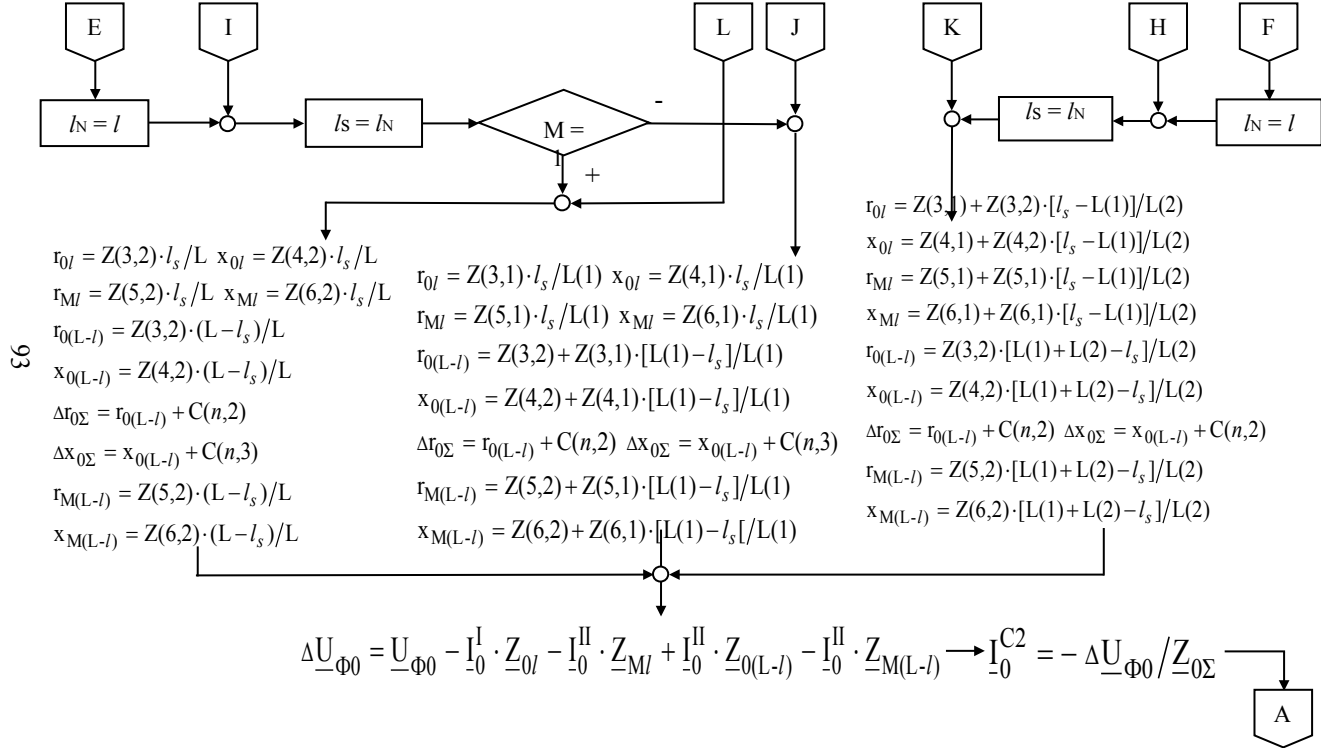


Рис. 3.12 – Блок-схема алгоритма определения расстояния до места повреждения при однофазном КЗ на одно- и двухцепной линиях с ответвлениями и без них







- токи прямой I_1 , обратной I_2 и нулевой I_0 последовательностей поврежденной фазы;
- напряжение нулевой последовательности параллельной линии \underline{U}_0^{Π} ;
- ток нулевой последовательности параллельной линии I_0^{Π} ;
- конфигурация линии ($N = 1$ – одноцепная линия, $M = 1$ – нет от-
ветвления, $F = 1$ – ответвление незаземлено);
- матрица параметров линии $Z(6,2)$ (таблица 3.1), матрица длин ли-
ний $L(2)$ ($L(I_1, I_2)$) и матрица параметров ответвления $O(3,2)$ (та-
блица 3.2);
- матрица параметров системы $C2$ (табл. 3.3);
- коэффициент демпфирования α , равный 0,5;
- точность итерационного процесса ε , составляющая 0,1% от длины
линии.

Таблица 3.1. Параметры линии

	$I1$		$I2$
	1		2
R1	1	r11	r12
X1	2	x11	x12
R0	3	r01	r02
X0	4	x01	x02
RM	5	rM1	rM2
XM	6	xM1	xM2
r_0^{Π}	7	r_{01}^{Π}	r_{02}^{Π}
x_0^{Π}	8	x_{01}^{Π}	x_{02}^{Π}

Реализация расчета в два этапа осуществляется следующим об-
разом:

- 1) формируется массив коэффициентов связи по параметрам ли-
нии в зависимости от ее конфигурации. Блок-схема формиро-
вания массива коэффициентов связи показана на рис.3.13;
- 2) обнуляется величина тока нулевой последовательности от си-
стемы $C2$ $I_0^{C2} = 0$, что соответствует неучету влияния системы
 $C2$;

- 3) в случае одноцепной линии ($N = 1$) обнуляется величина тока нулевой последовательности магнитосвязанной линии $I_0^{\Pi} = 0$;
- 4) рассчитывается предварительное расстояние до места повреждения, с учетом конфигурации линии. В случае наличия ответвлений с заземленными нейтральными трансформаторов ($M = 0$, $F = 0$) рассчитывается ток нулевой последовательности от ответвления. Блок-схема учета токов ответвления приведена на рис.3.14;
- 5) запоминается предварительное расстояние до места повреждения ($lN = l$);
- 6) начинается цикл итерационного процесса уточненного расчета расстояния до места повреждения с начальным приближением равным предварительному расстоянию до места повреждения (lN);
- 7) производится n -ое количество уточненных расчетов соответствующее количеству записей (N_m) параметров системы $C2$;
- 8) выводятся результаты расчета.

Таблица 3.2. Параметры ответвления

	1		2
$\underline{Z}_{0\text{отвл}}^I$	1	$r_{0\text{отвл}}$	$x_{0\text{отвл}}$
$\underline{Z}_{0\text{трф}}^I$	2	$r_{0\text{трф}}$	$x_{0\text{трф}}$
$\underline{Z}_{\text{мотв}}$	3	$R_{\text{мотв}}$	$X_{\text{мотв}}$
$\underline{Z}_{0\text{отвл}}^{\Pi}$	4	$r_{0\text{отвл}}^{\Pi}$	$x_{0\text{отвл}}^{\Pi}$
$\underline{Z}_{0\text{трф}}^{\Pi}$	5	$r_{0\text{трф}}^{\Pi}$	$x_{0\text{трф}}^{\Pi}$

Таблица 3.3. Параметры системы

Дата		R_{0C2}	x_{0C2}	r_{2C2}	x_{2C2}	E'_{C2}	E''_{C2}
	1	2	3	4	5	6	7
1							
...							
N							

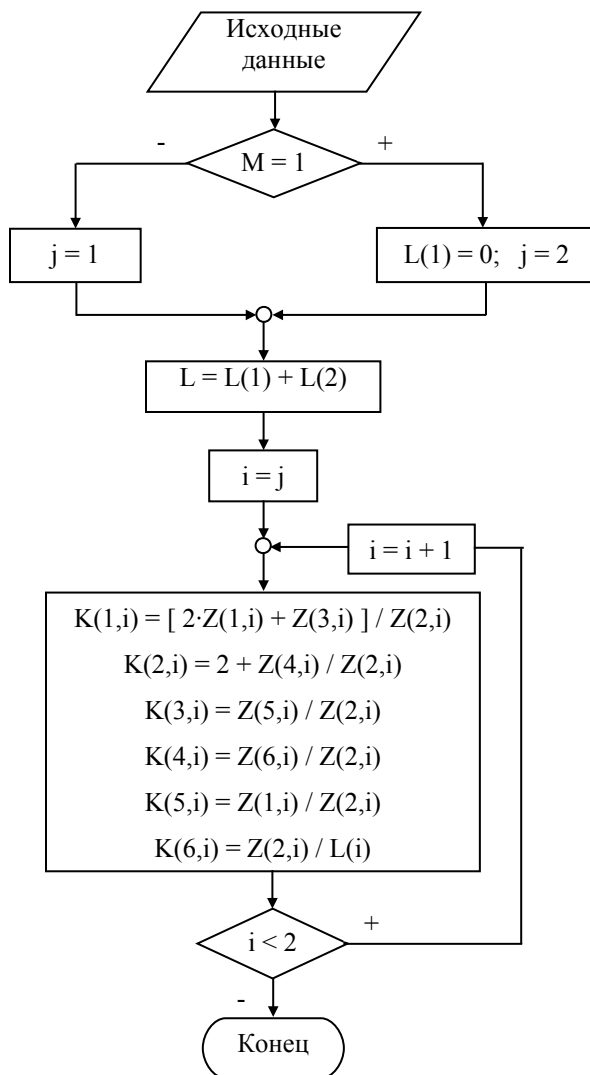


Рис. 3.13 – Блок-схема формирования массива коэффициентов связи

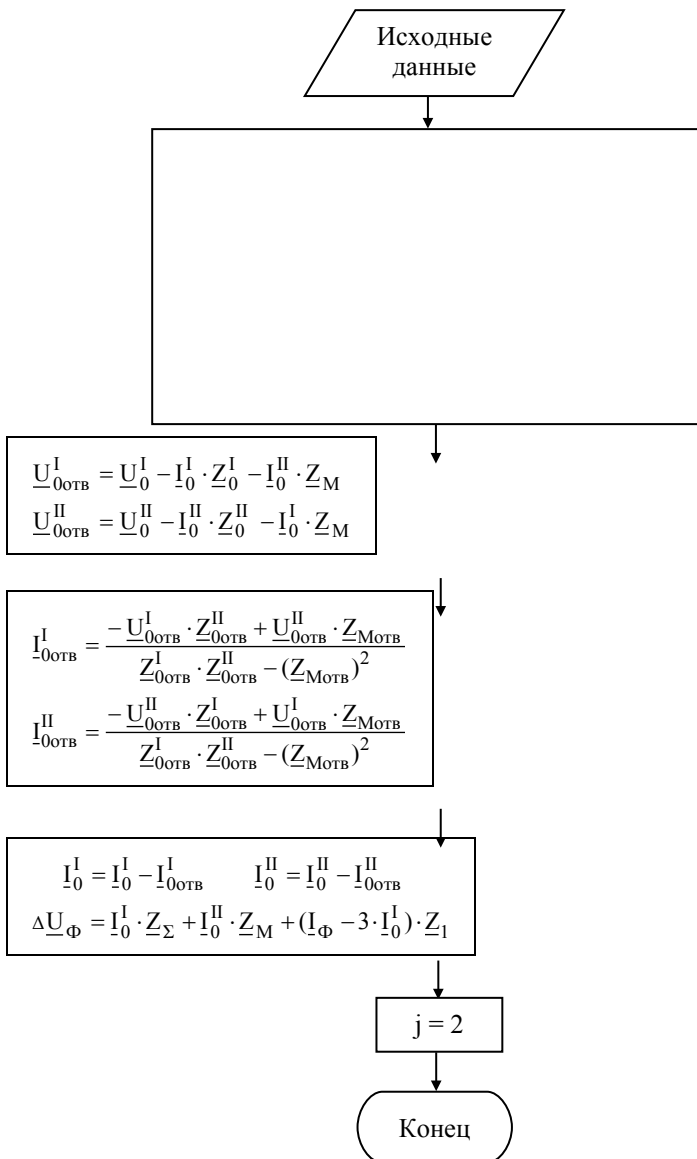


Рис. 3.14 – Блок-схема учета ответвления

Алгоритм расчета расстояния до места повреждения при однофазном КЗ, изображенный в виде блок-схемы на рис.3.12, справедлив при повреждениях на двухцепной и одноцепной линии с и без ответвления при двухстороннем питании линии.

Двухфазное КЗ. Основой для создания алгоритма одностороннего определения расстояния до места повреждения при двухфазном КЗ на одноцепной и двухцепной линии с и без ответвлений послужило расчетное выражение (2.45), в которых величина $\text{tg}\varphi_2$ определяется по (2.43). На рис.3.15 приведена блок-схема алгоритма одностороннего определения расстояния до места повреждения при двухфазном КЗ.

В качестве исходных данных рассматриваемого алгоритма выступают следующие величины:

- напряжения поврежденных фаз (\underline{U}_2 и \underline{U}_3) и напряжение обратной последовательности особой фазы (\underline{U}_{12}) поврежденной линии;
- токи поврежденных фаз (\underline{I}_2 и \underline{I}_3) и ток обратной последовательности особой фазы (\underline{I}_{12}) поврежденной линии;
- ток (\underline{I}_{12}^{Π}) и напряжение (\underline{U}_{12}^{Π}) обратной последовательности особой фазы параллельной линии;
- конфигурация линии (N, M);
- матрица параметров линии $Z(2,2)$ (таблица 3.4), матрица длин линий $L(2)$ ($L(l_1, l_2)$);
- матрица параметров системы $C2$ (табл. 3.3);
- коэффициент демпфирования α ;
- точность итерационного процесса ε .

Таблица 3.4. Длины линий

	l_1		l_2
	1		2
R1	1	r11	r12
X1	2	x11	x12

Формирование исходных данных, в частности, напряжения и токов поврежденных фаз, а также тока и напряжения обратной последовательности особой фазы зависит от особой фазы. На рис.3.16 показана блок-схема формирования исходных данных параметров аварийного режима в зависимости от особой фазы.

Реализация расчета в два этапа при двухфазном КЗ аналогична однофазному КЗ.

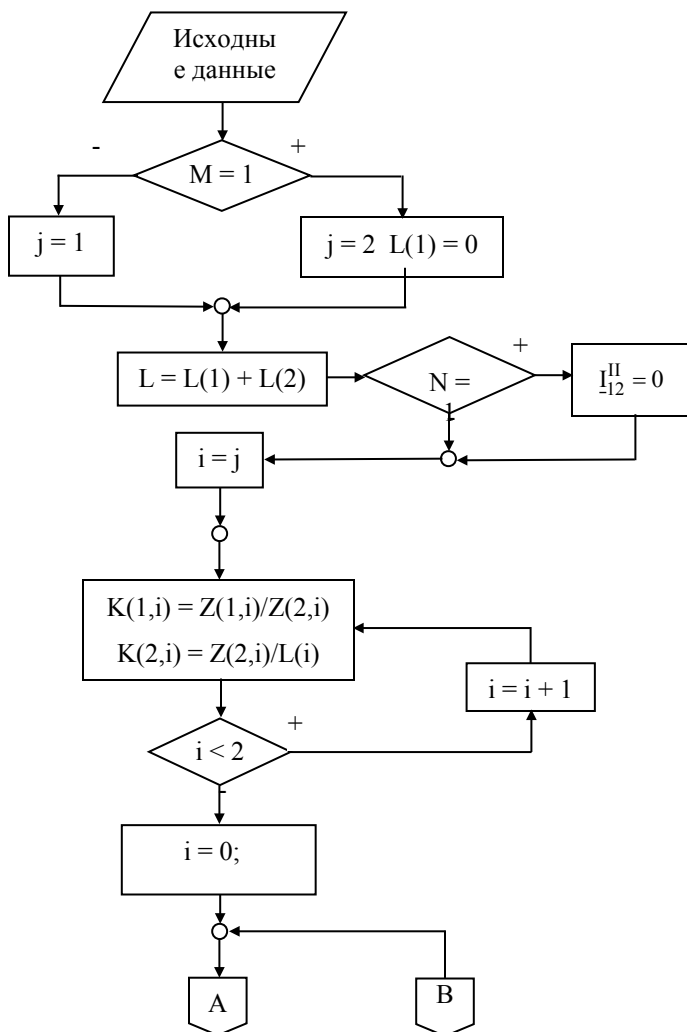
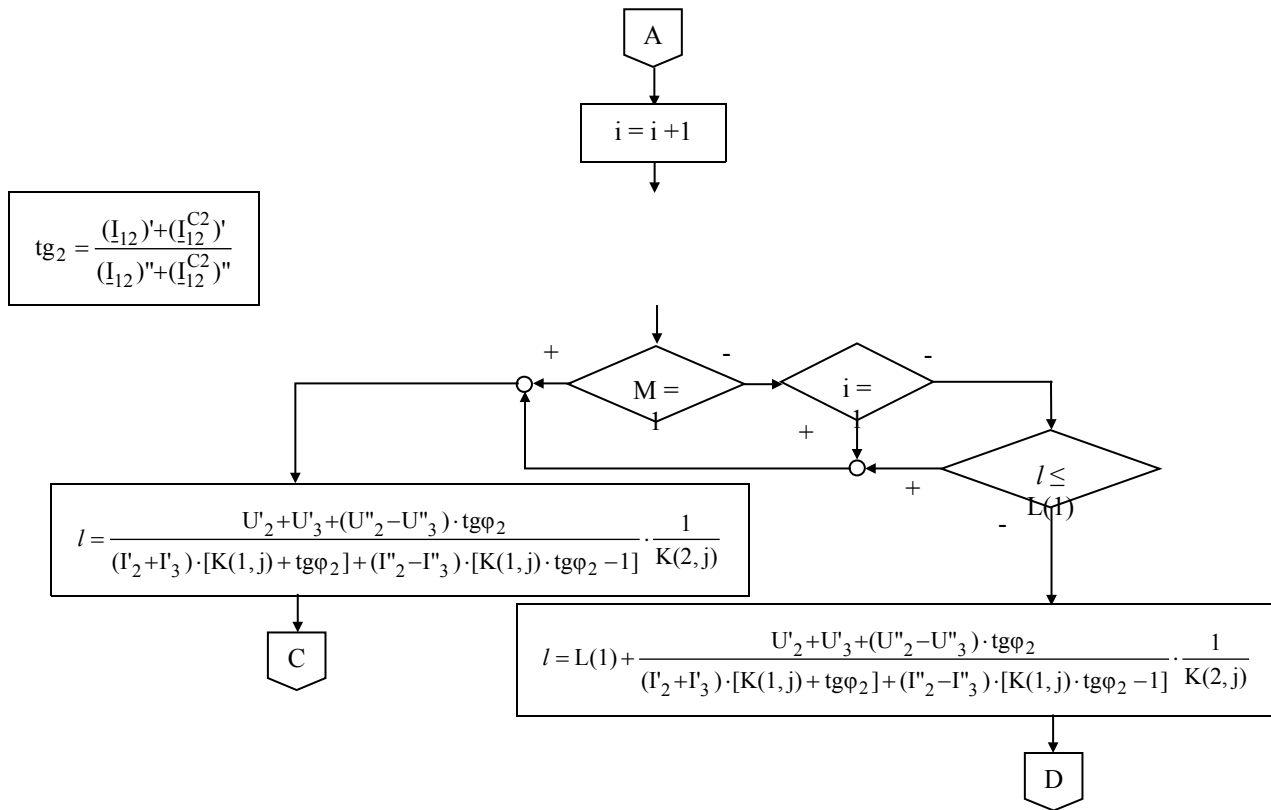
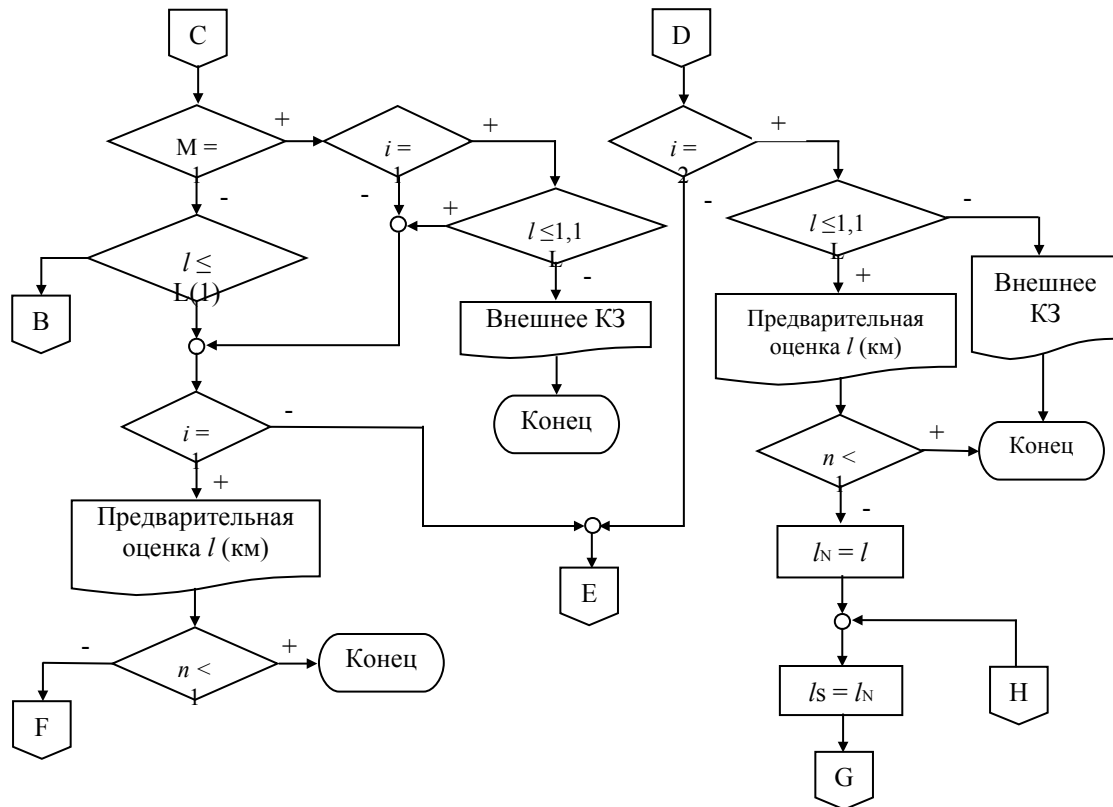
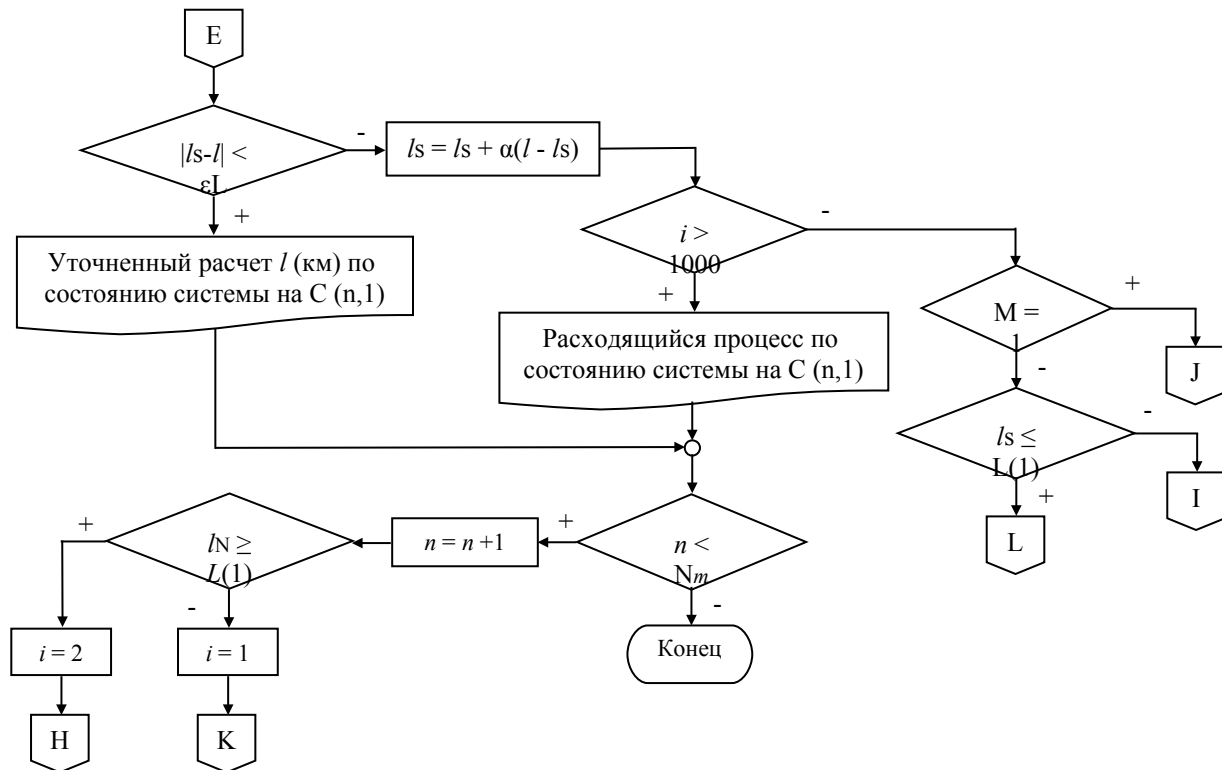


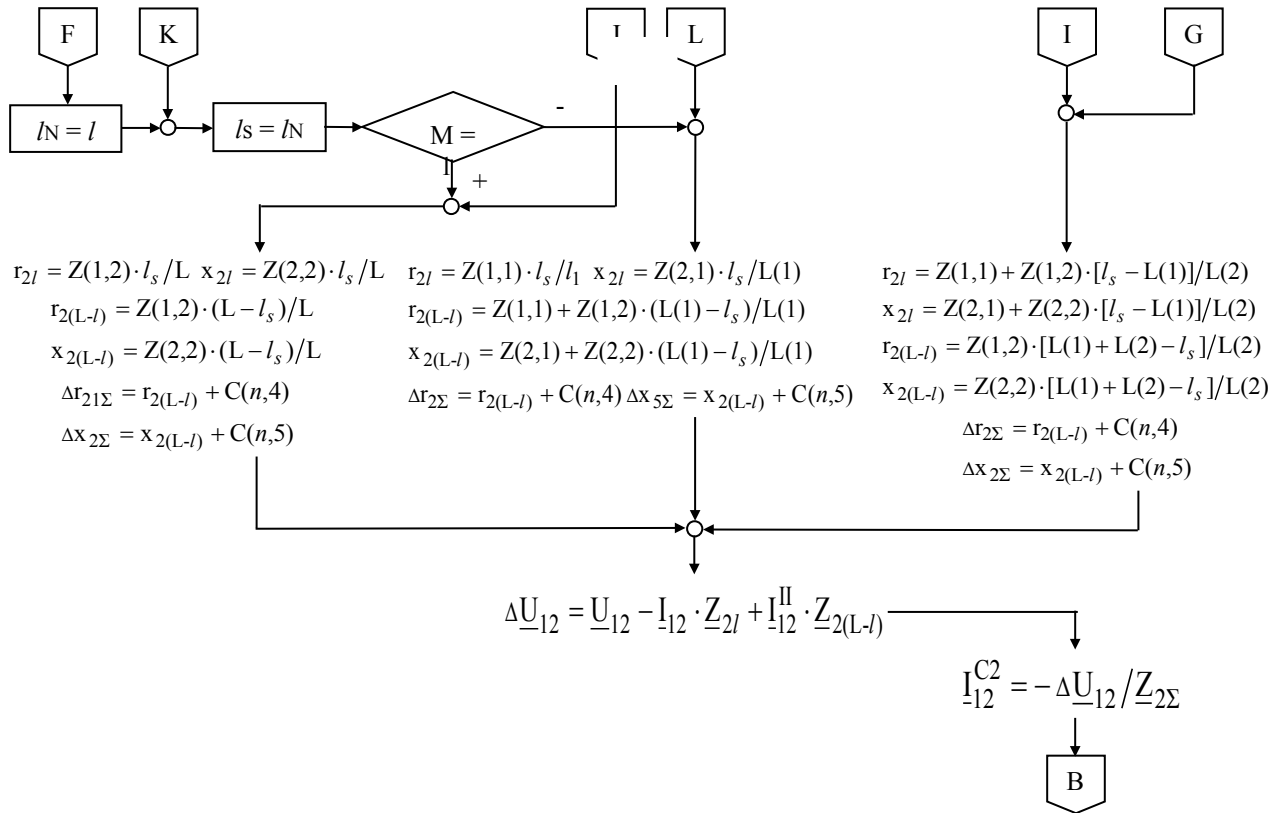
Рис. 3.15 – Блок-схема алгоритма определения расстояния до места повреждения при двухфазном КЗ на одно- и двухцепной линиях

с ответвлениями и без них









Алгоритм расчета расстояния до места повреждения при двухфазном КЗ, изображенный в виде блок-схемы на рис.3.15, справедлив при повреждениях на двухцепной и одноцепной линиях с и без ответвления при двухстороннем питании линии.

Трехфазное КЗ. Основой для создания алгоритма одностороннего определения расстояния до места повреждения при трехфазном КЗ на одноцепной и двухцепной линии с и без ответвлений послужило расчетное выражение (2.56), в которых величина $\text{ctg}\varphi$ определяется по (2.51). На рис.3.17 приведена блок-схема алгоритма одностороннего определения расстояния до места повреждения при трехфазном КЗ.

В качестве исходных данных рассматриваемого алгоритма выступают следующие величины:

- фазные напряжения (\underline{U}_A , \underline{U}_B , \underline{U}_C) и фазные токи (\underline{I}_A , \underline{I}_B , \underline{I}_C) поврежденной линии;
- фазные напряжения ($\underline{U}_A^{\text{II}}$, $\underline{U}_B^{\text{II}}$, $\underline{U}_C^{\text{II}}$) и фазные токи ($\underline{I}_A^{\text{II}}$, $\underline{I}_B^{\text{II}}$, $\underline{I}_C^{\text{II}}$) параллельной линии;
- конфигурация линии (N, M);
- матрица параметров линии $Z(2,2)$ (табл. 3.4), матрица длин линий $L(2)$ ($L(l_1, l_2)$);
- матрица параметров системы $C2$ (табл. 3.3);
- коэффициент демпфирования α ;
- точность итерационного процесса ε .

Реализация расчета в два этапа при трехфазном КЗ аналогична однофазному КЗ.

Алгоритм расчета расстояния до места повреждения при трехфазном КЗ, изображенный в виде блок-схемы на рис.3.17, справедлив при повреждениях на двух- и одноцепной линиях с и без ответвления при двухстороннем питании линии.

3.3.2 Блок определения параметров системы C2

На рис.3.18 показана блок-схема алгоритма определения параметров системы $C2$ при КЗ “за спиной”. После расчета параметров системы $C2$ они сохраняются в памяти компьютера с указанием даты и времени.

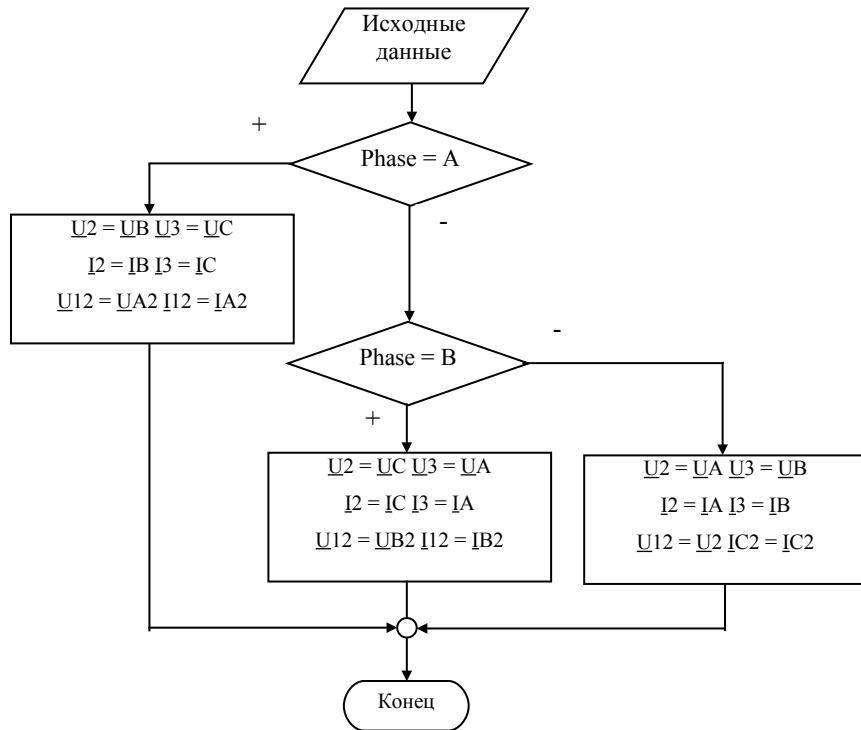


Рис. 3.16 – Блок-схема формирования параметров аварийного режима

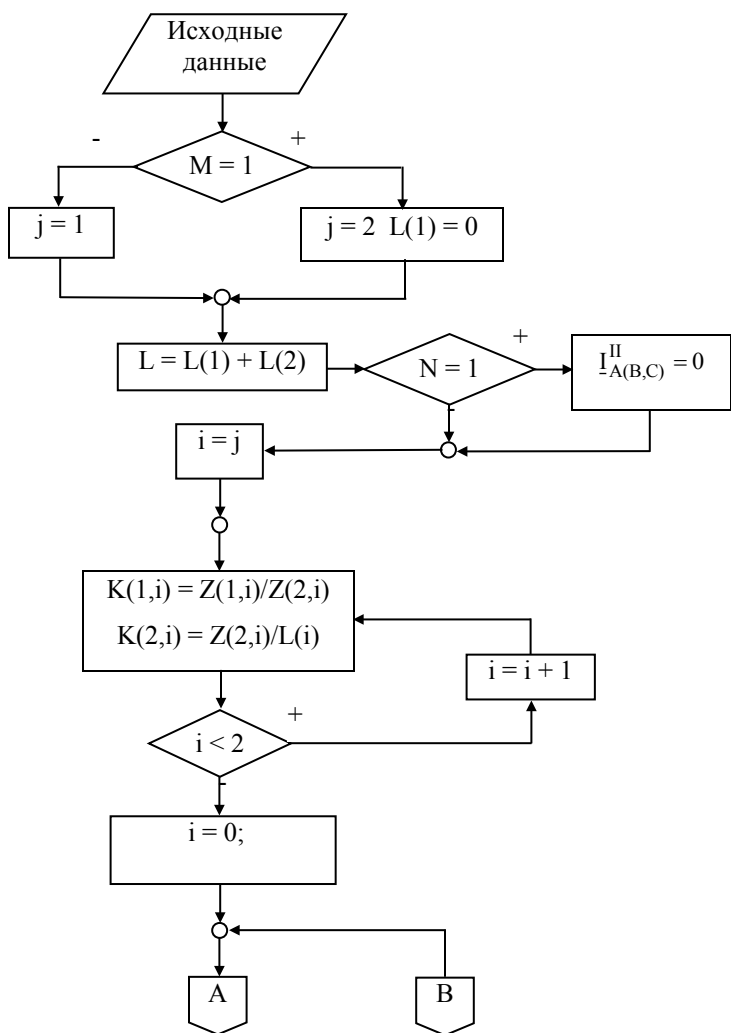
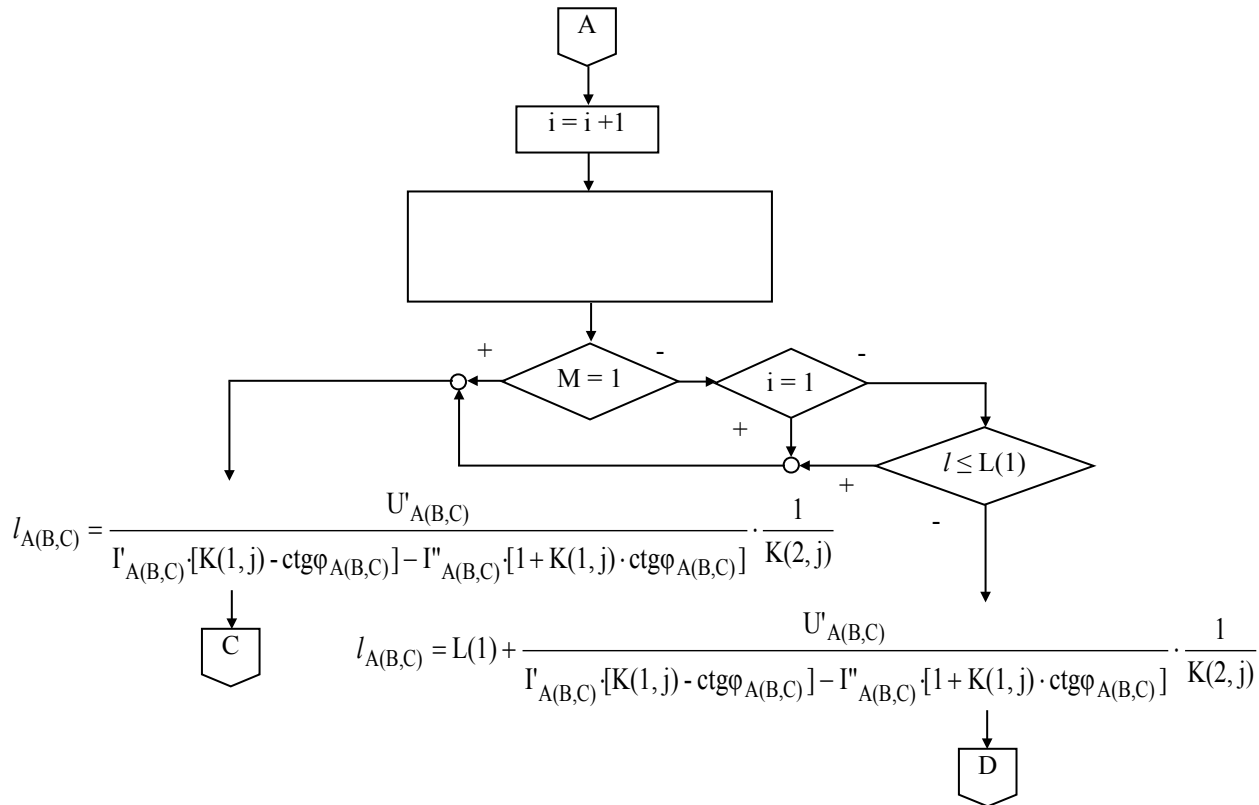
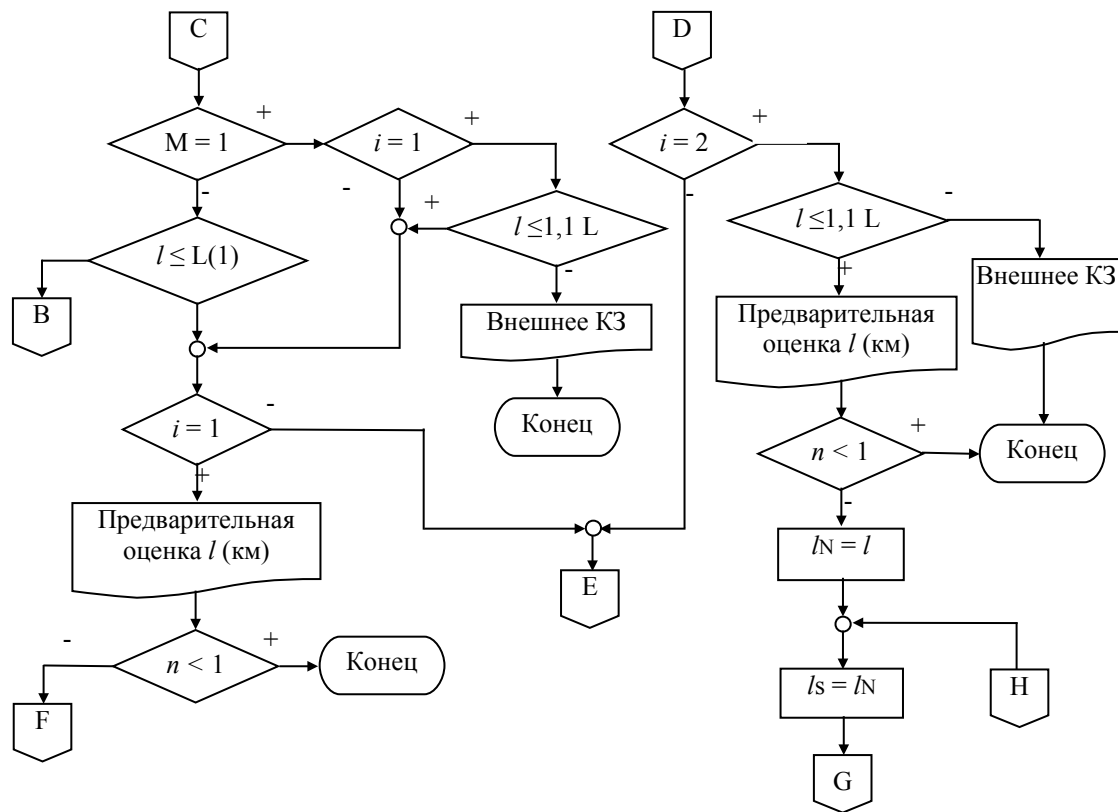
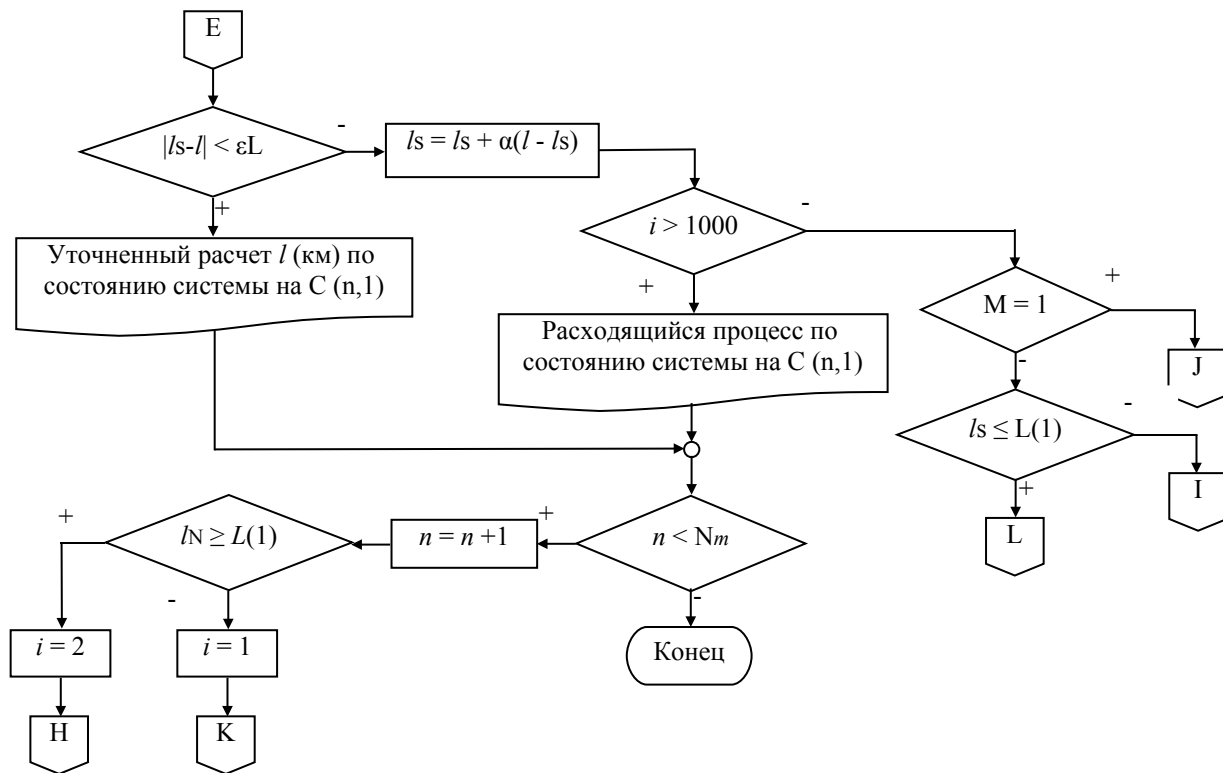
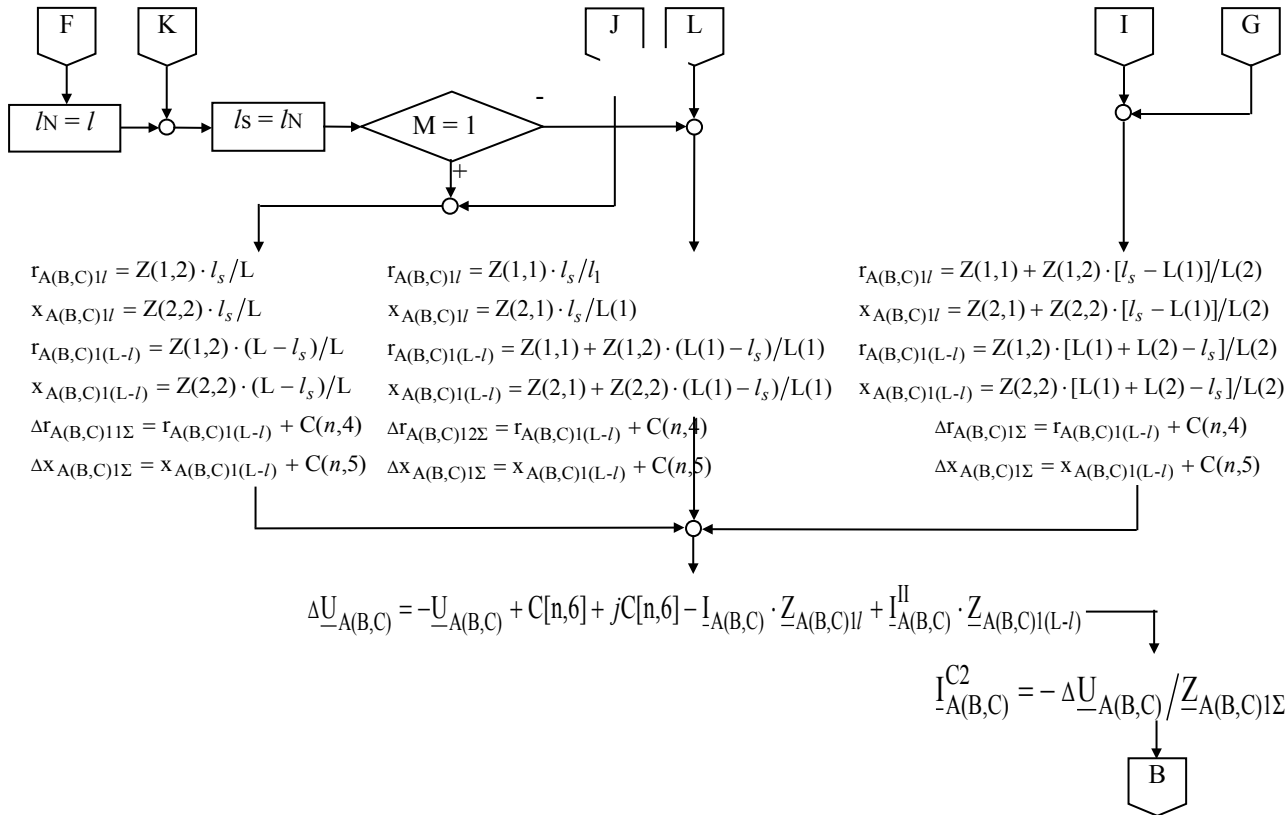


Рис. 3.17 – Блок-схема алгоритма определения расстояния до места повреждения при трехфазном КЗ на одно- и двухцепной линиях с ответвлениями и без них









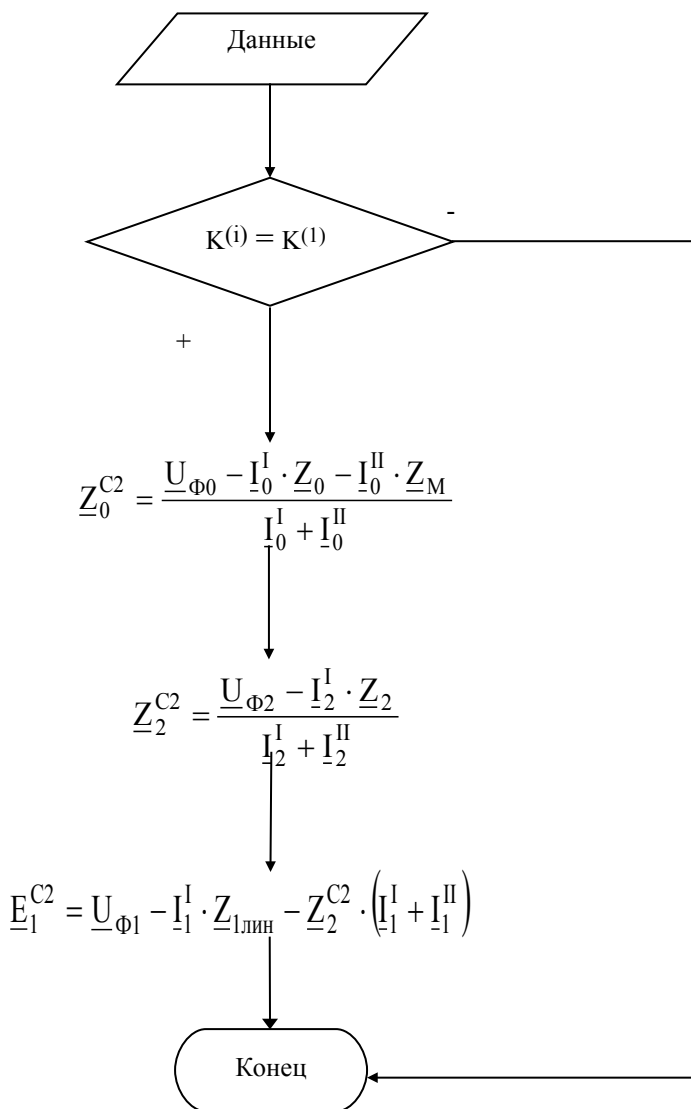


Рис. 3.18 – Блок схема БОПС

4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕСТА ПОВРЕЖДЕНИЯ В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

В данном разделе приведены результаты анализа по определению расстояния до места повреждения ряда аварийных отключений линий, зафиксированных в ходе эксплуатации программно-аппаратных комплексов "ЦПРС" и "Рекон-06БС". Место повреждения рассматриваемых отключений линий установлено при их осмотре. Анализ аварийных отключений линий производится с помощью программного продукта обработки аварийных процессов "АНФАС". Для совместимости данных "ЦПРС" и "РЕКОН-06БС" используется общий формат обмена данными переходного процесса в энергетических системах (COMTRADE) стандарта IEEE.

4.1 Программно-аппаратный комплекс "ЦПРС"

Программно - аппаратный комплекс "ЦПРС" [63] предназначен для регистрации аварийных процессов в электроэнергетических системах, создания файлов записей аварийных процессов и передачи этих файлов удаленному пользователю для последующего их анализа, обработки и при необходимости документирования.

"ЦПРС" состоит из автономного цифрового регистратора аварийных процессов "ФАС" и программного обеспечения "АНФАС". Структурная схема ЦПРС аналогична приведенной на рис.3.10.

"ЦПРС" устанавливается на элемент электроэнергетической системы, например ПС, и работает следующим образом. Постоянно осуществляется мониторинг параметров режима контролируемого объекта (напряжений секций шин и токов отходящих от ПС линии). При возникновении аварийного режима "ФАС" формирует, записывает и сохраняет файл аварийного процесса, включающий в себя предаварийный (нормальный), аварийный и послеаварийный режимы. Файл аварийного процесса является записью мгновенных значений напряжений и токов контролируемого объекта с частотой дискретизации 5 кГц. Длительность записи всего файла составляет 12,8 сек., из которых первые 0,4 сек. это предаварийный режим. После формирования файла аварийного процесса происходит его обработка с помощью "АНФАС".

Программный продукт "АНФАС" является мощным инструментом анализа и обработки аварийных процессов, работающим в интерактивном режиме. "АНФАС" рассчитан для функционирования в среде операционных систем Windows-98/2000/XP персональных компьюте-

ров на базе процессоров не ниже i486DX (или совместимых) со стандартным набором устройств ввода и вывода информации.

Для анализа аварийных процессов в "АНФАС" реализованы следующие основные функции:

- поддержка формата обмена данными переходных процессов в энергетических системах (COMTRADE) стандарта IEEE;
- определение момента аварийного режима и интервала времени, по которому определяются параметры аварийного режима, в дальнейшем расчетный интервал ПАР;
- определение поврежденной линии;
- определение вида КЗ;
- определение векторов действующих значений параметров аварийного режима;
- определение векторов действующих значений прямой, обратной и нулевой последовательностей параметров аварийного режима;
- определение гармонического состава параметров аварийного режима;
- определение места повреждения по параметрам аварийного режима, способы и методика которого изложено во 2 и 3 разделах.

Для решения задачи ОМП в "АНФАС" предусмотрено три независимых режима работы: автоматический, полуавтоматический и информационный. Результатом работы автоматического и полуавтоматического режимов является определение расстояния до места повреждения, результатом работы информационного режима – информация о параметрах аварийного режима, которая в дальнейшем используется для установления расстояния до места повреждения по расчетным выражениям определяемыми пользователем.

При автоматическом режиме работы расчет расстояния до места повреждения осуществляется без участия пользователя и предусматривает определение поврежденной линии, вида КЗ и расчетного интервала ПАР по заранее заданным условиям. В связи со сложностями автоматического выявления характерных этапов аварийных отключений линий, связанных с действием релейной защиты и автоматики, таких, например, как отключение линии или действие автоматического повторного включения (АПВ), в автоматическом режиме работы реализовано определение расстояния до места повреждения по расчетному интервалу ПАР, находящемуся на начальном этапе аварии. Расчетный интервал ПАР должен охватывать установившийся режим КЗ, поэтому его определение зависит, во первых, от постоянной времени затухания апериодической составляющей тока КЗ τ_a , во вторых, от времени срабатывания релейной защиты, и в третьих от точности определения действующих значений ПАР за некоторый интервал времени. Так, для сетей напряжением 110 кВ τ_a составляет величину порядка

0,01 с [109], а минимальное время срабатывания быстродействующих защит порядка 0,1 сек. Разность τ_a и времени срабатывания защиты определяет интервал времени, на котором можно определять ПАР. Исходя из этого, для определения расчетного интервала ПАР, были приняты следующие условия:

- отступ расчетного интервала ПАР от начального момента КЗ — 0,03 с;
- длительность расчетного интервала ПАР — 0,04.

Полуавтоматический режим отличается от автоматического тем, что предусматривает определение расчетного интервала ПАР пользователем.

Информационный режим предусматривает определение пользователем вида КЗ, поврежденной линии и расчетного интервала ПАР.

Полуавтоматический и информационный режимы работы позволяют решать задачу определения места повреждения более гибко и как следствие с большей точностью. Они предназначены для квалифицированных специалистов энергетиков.

4.2 Анализ аварийных отключений линий

Программно-аппаратный комплекс "ЦПРС" установлен на ПС "СиМ" и ПС "И", а "Рекон-06БС" — на ПС "К". Этими комплексами контролируются напряжения всех секций шин и токи всех отходящих линий ПС, на которых они установлены.

4.2.1 Повреждение ВЛ "Л – СиМ"

Согласно записи оперативного журнала 21.03.00 в 14:39 на ВЛ "Л-СиМ" имело место однофазное КЗ. Поврежденная фаза — фаза А. Причина отключения ВЛ — закорачивание линии "Л-СиМ" грозозащитным тросом пересекающей ее ВЛ 330 кВ. Расстояние до места повреждения составило 11,31 км от ПС "Серп и Молот" ("СиМ").

Описание поврежденной линии. Линия "Л-СиМ" связывает ПС "СиМ" и ПС "Л" и является двухцепной с ответвлением на ПС "ГПЗ 8". ВЛ "Л-СиМ" имеет пересечение с ВЛ 330 кВ. Полная длина линии от ПС "СиМ" до ПС "Л" 12,563 км; расстояние от ПС "СиМ" до ответвления 9,784 км; длина ответвления 2 км; расстояние от ПС "СиМ" до пересечения с ВЛ 330 кВ 11,31 км. На рис.4.1 показана схема замещения линии.

В доаварийном режиме обе цепи поврежденной линии "Л-СиМ" включены и работают параллельно. Нейтрали трансформаторов на ПС "ГПЗ 8" разомкнуты.

Полная осциллограмма аварийного отключения линии приведена на рис.4.2. В рассматриваемой записи аварийного отключения линии можно выделить три характерных этапа.

1 этап: однофазное короткое замыкание на линии "Л-СиМ" №1 (рис 4.3.а). Первый этап аварии заканчивается отключением линии "Л-СиМ" №1 с противоположного замера конца линии — со стороны ПС "Лосево". Характерной особенностью 1-го этапа аварии является подпитка места КЗ с двух сторон линии - со стороны ПС "СиМ" и ПС "Лосево".

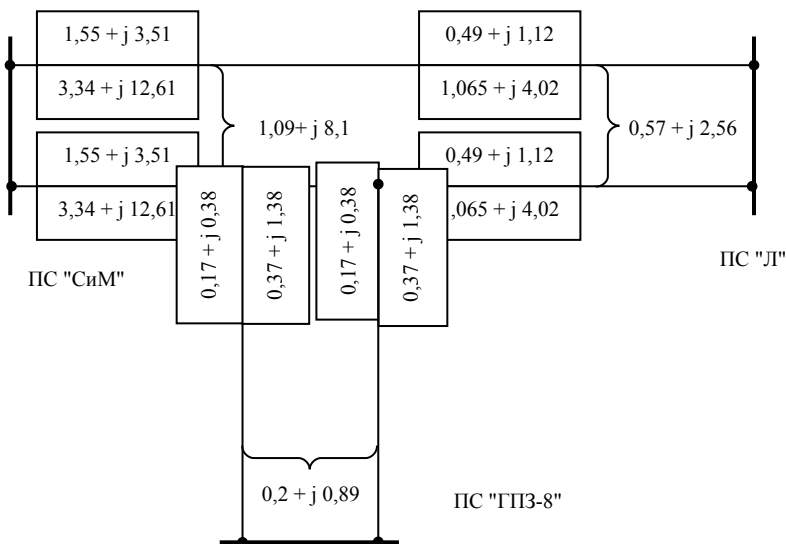


Рис.4.1 – Схема замещения линии "Л-СиМ"

2 этап: продолжение однофазного КЗ на линии "Л-СиМ" №1 с отключенным выключателем со стороны ПС "Л" (рис.4.3.б). Второй этап заканчивается отключением линии "Л-СиМ" № 1. Характерная особенность 2-го этапа аварии — подпитка места КЗ с одной стороны линии - со стороны ПС "СиМ".

3 этап: однофазное КЗ на линии "Л-СиМ" № 2 (рис.4.3.в). Третий этап заканчивается отключением линии "Л-СиМ" № 2. Характерная особенность 3-го этапа аварии — подпитка места КЗ с двух сторон линии при отключенной параллельной линии "Л-СиМ" № 1.

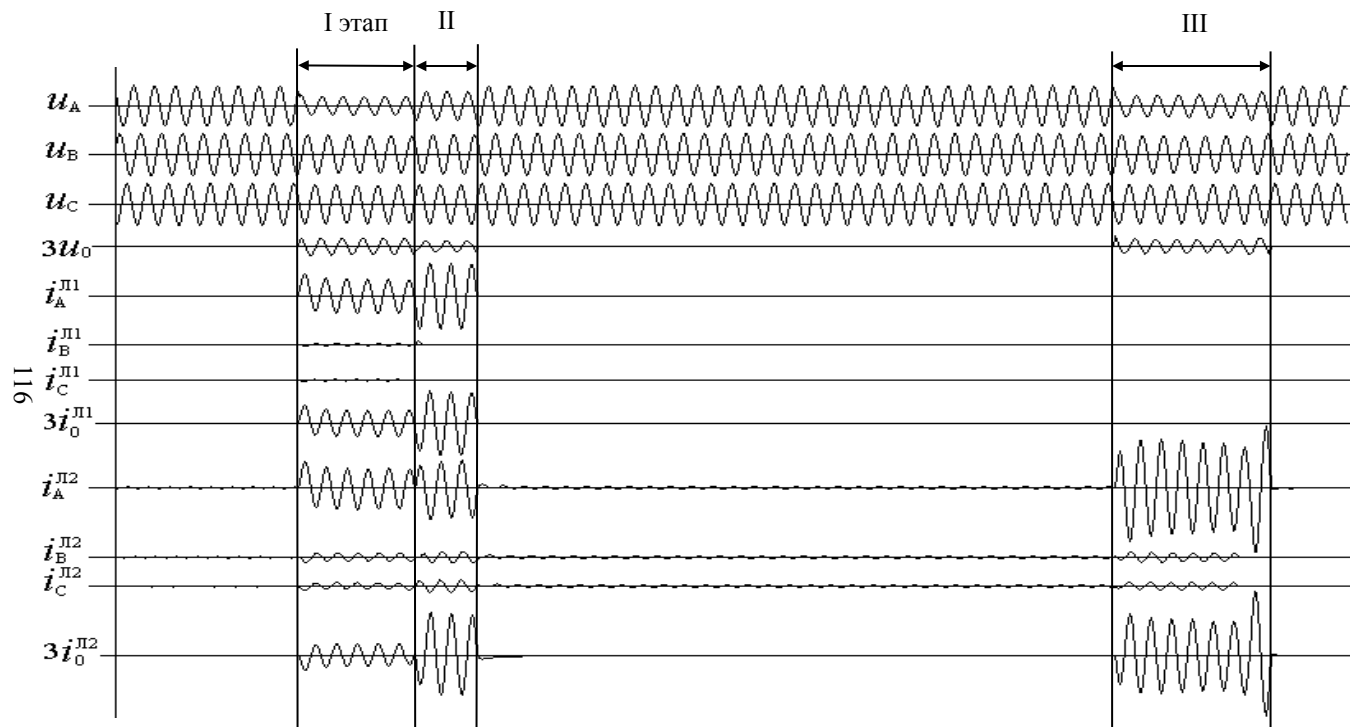


Рис.4.2 – Полная осциллограмма аварийного отключения ВЛ "Л-СиМ"

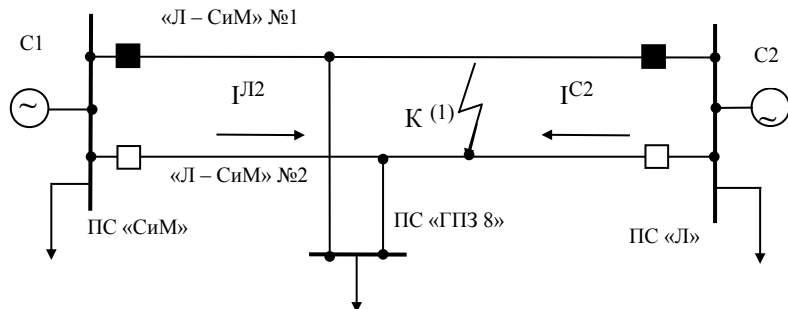
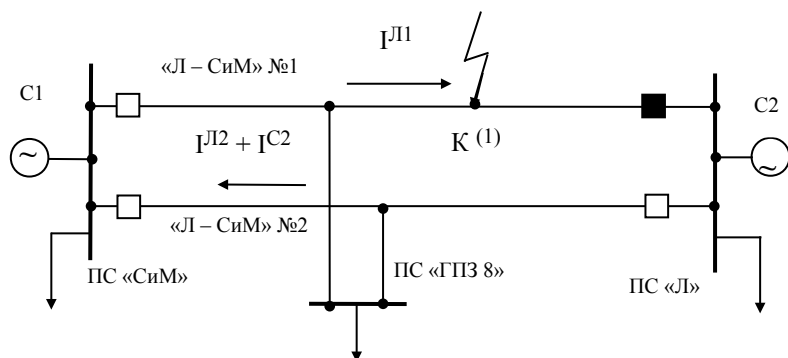
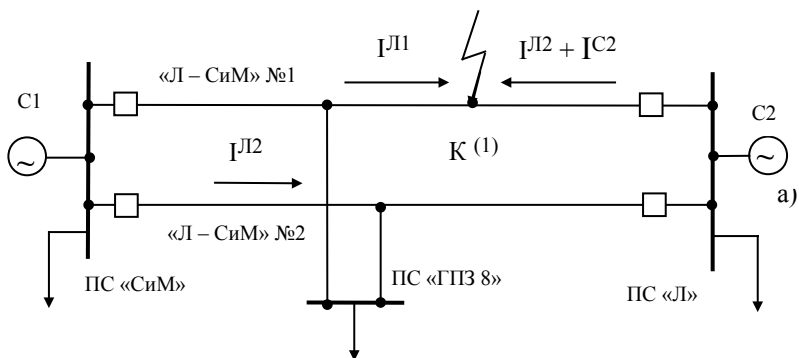


Рис.4.3 – Расчетная схема линии:
а) первый этап; б) второй этап; в) третий этап

Проведем определение места повреждения, применяя автоматический, полуавтоматический и информационный режимы работы "АНФАС".

Автоматический режим работы. Автоматически определены поврежденная линия — "Л-СиМ" №1, вид КЗ — однофазное, поврежденная фаза — А и расчетный интервал ПАР, изображенный на рис.4.4. В результате этого режима работы было получено два решения задачи определения расстояния до места повреждения. Первое решение — предварительное определение расстояния до места повреждения без учета системы с противоположного конца линии С2. И второе — уточненное определение расстояния до места повреждения с учетом системы С2 по ее состоянию на 21.03.00 14.39. Предварительное расстояние составило величину 11,06 км, уточненное — 11,18 км, при этом погрешность предварительного расстояния равна 2,2%, а уточненного — 1,1%.

Полуавтоматический режим работы. В полуавтоматическом режиме работы было рассмотрено два этапа аварии, первый и второй, для которых расчетные интервалы ПАР задавались вручную. При выборе расчетных интервалов ПАР были определены оптимальные интервалы установившихся режимов КЗ.

1 этап аварии. Длительность расчетного интервала ПАР 0,04 с, отступ от начального момента КЗ 0,041 с (рис.4.5). Предварительное расстояние до места повреждения составило величину 11,19 км (погрешность 1%), уточненное расстояние — 11,3 км, по состоянию системы на 21.03.00 14.39 (погрешность меньше 1%).

2 этап аварии. Учитывая, что особенностью второго этапа аварии является подпитка места КЗ с одной стороны линии, в полуавтоматическом режиме работы был произведен расчет только предварительного расстояния до места повреждения. Длительность расчетного интервала ПАР 0,04 с, отступ от начала КЗ — 0,125 с. Расстояние до места повреждения составило величину 11,2 км (погрешность 1%).

Информационный режим работы. В информационном режиме работы были рассмотрены также первый и второй этапы аварийного отключения линии. Расчетные интервалы ПАР аналогичны выбранным в полуавтоматическом режиме работы. Результат работы информационного режима приведен в таблицах 4.1 и 4.2 соответственно для первого и второго этапов аварии. Все параметры аварийного режима приведены относительно вектора напряжения поврежденной фазы, направленного по вещественной оси.

На основе полученных значений параметров аварийных режимов рассчитаем предварительное и уточненное расстояние до места повреждения по первому этапу аварийного отключения линии. Для этого воспользуемся расчетными выражениями, полученными во второй и третьей главах данной работы.

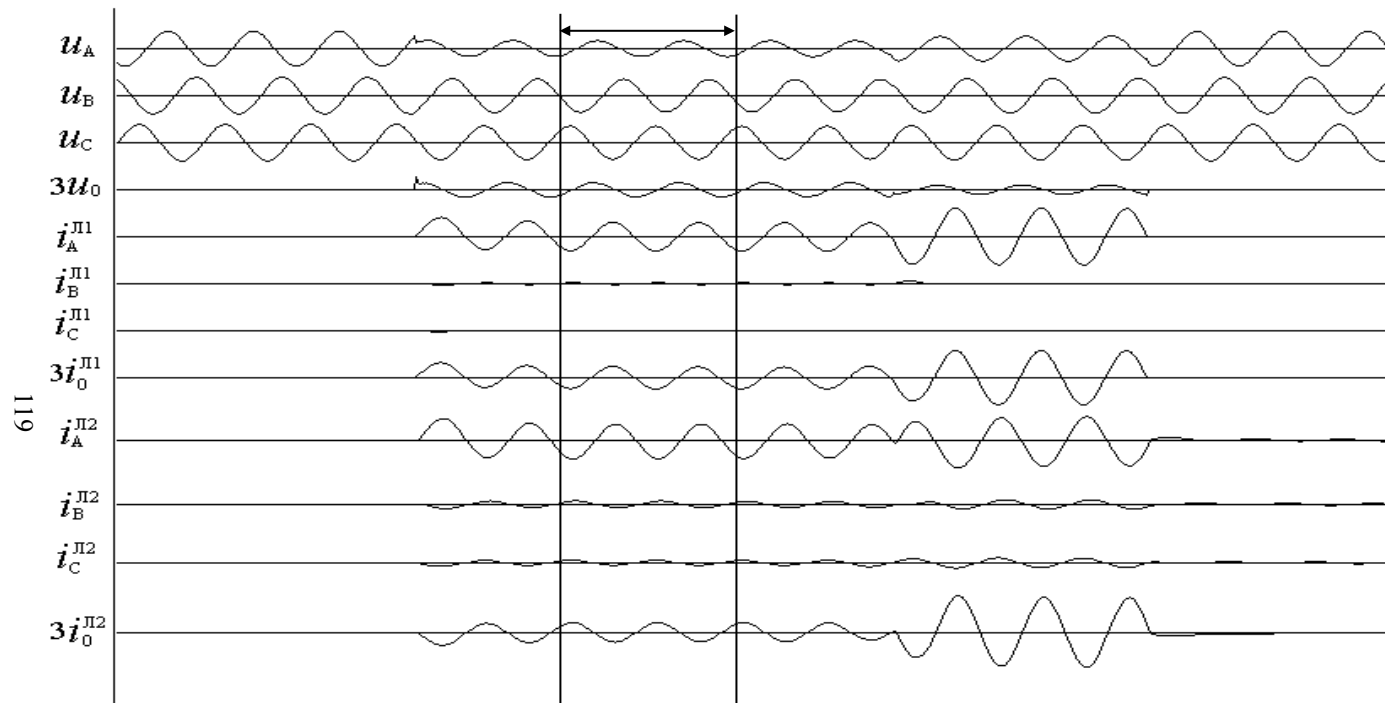


Рис.4.4 – Расчетный интервал ПАР автоматического режима работы при анализе записи аварийного отключения ВЛ "Л-СиМ"

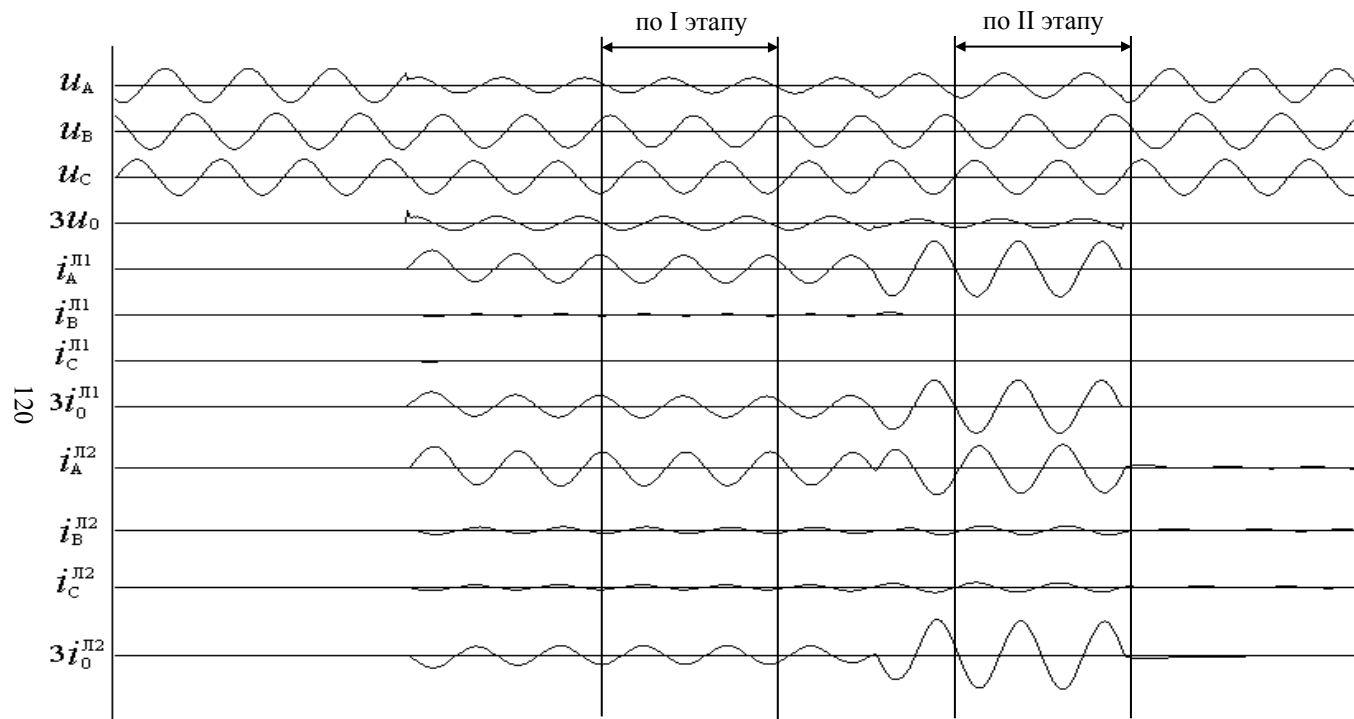


Рис.4.5 – Расчетные интервалы ПАР полуавтоматического режима работы при анализе записи аварийного отключения ВЛ "Л-СиМ"

Предварительный расчет. Предположим, что место повреждения находится на участке от ПС "СиМ" до ответвления на ПС "ТПЗ-8". Тогда для определения предварительного расстояния до места повреждения воспользуемся расчетным выражением (2.19), в котором величина $\text{ctg}\varphi_k$ определяется выражением (2.17).

Таблица 4.1. Результат информационного режима по первому этапу аварийного отключения ВЛ "Л-СиМ"

	Напряжение поврежденной линии			Ток поврежденной линии			Ток параллельной линии		
	Ua	Ub	Uc	Ia	Ib	Ic	Ia	Ib	Ic
Действующее значение (кВ, кА)	30,49	58,44	59,92	3,48	0,37	0,31	1,72	0,399	0,33
Фаза (град)	0	253,1	120,4	297,6	110,6	131,6	290,8	99,19	121,6

Таблица 4.2. Результат информационного режима по второму этапу аварийного отключения ВЛ "Л-СиМ"

	Фазные напряжения поврежденной линии			Фазные токи поврежденной линии			Фазные токи параллельной линии		
	Ua	Ub	Uc	Ia	Ib	Ic	Ia	Ib	Ic
Действующее значение (кВ, кА)	46,6	61,8	61,6	6,7	0	0,01	2,4	0,53	0,57
Фаза (град)	0	244,3	120,5	-66,1	0	144,6	97,4	86,49	116,9

Векторы токов и напряжения нулевой последовательности имеют следующие значения:

- ток нулевой последовательности поврежденной линии

$$\dot{I}_0^I = 0,937 \angle -62,95 \text{ кА};$$

- напряжение нулевой последовательности поврежденной линии
 $\underline{U}_0^I = 5,68 \angle -162,5 \text{ кВ};$
- ток нулевой последовательности параллельной линии
 $\underline{I}_0^{II} = 0,337 \angle -65,5 \text{ кА}.$

Коэффициенты связи определяем согласно выражению (2.10) по параметрам линии, приведенным на рис.4.1:

- $K_R = (2 \cdot 1,55 + 3,34) / 3,51 = 1,837;$
- $K_X = 2 + 12,61 / 3,51 = 5,593;$
- $K_{MR} = 1,09 / 3,51 = 0,311;$
- $K_{MX} = 8,1 / 3,51 = 2,307;$
- $K_{RI} = 1,55 / 3,51 = 0,441;$
- $X_{уд} = 3,51 / 9,784 = 0,3587.$

Составляющие выражения (2.19):

- $\text{Re}(\Delta \underline{I}_\Phi^I) = 1,62 - 3 \cdot 0,426 = 0,336;$
- $\text{Im}(\Delta \underline{I}_\Phi^I) = -3,08 - 3 \cdot (-0,834) = -0,579;$
- $\text{Re}(\underline{I}_X) = 0,426 \cdot 1,834 - (-0,835) \cdot 5,593 + 0,125 \cdot 0,31 - (-0,312) \cdot 2,307 + 0,336 \cdot 0,441 - (-0,579) = 6,94;$
- $\text{Im}(\underline{I}_X) = 0,426 \cdot 5,593 + (-0,835) \cdot 1,834 + 0,125 \cdot 2,31 + (-0,312) \cdot 0,31 + 0,336 + (-0,579) \cdot 0,441 = 1,125;$
- $\text{ctg} \varphi_k = (0,4266 + 0,125 + 0) / (-0,835 - 0,313 - 0) = -0,481.$

Предварительное расстояние до места повреждения:

$$L_{кз} = (30,49 - 0 \cdot (-0,481)) / ((6,94 - 1,125 \cdot (-0,481)) \cdot 0,3587) = 11,363 \text{ км}.$$

Величина 11,363 км > 9,784 км, следовательно, место повреждения находится за пределами рассматриваемого участка линии. Исходя из этого, рассмотрим следующий вариант. Предположим, что место повреждения находится на участке линии от ПС "ГПЗ-8" до ПС "Л". Расчет расстояния до места повреждения произведем по выражению (2.18). В силу того, что нейтрали трансформаторов на ПС "ГПЗ-8" разомкнуты, ток нулевой последовательности до ответвления будет равен току нулевой последовательности после ответвления $\underline{I}_0^{\text{lab}} = \underline{I}_0^{\text{lbc}}$. При пренебрежении токами нагрузки ответвления фазный ток до ответвления будет равен фазному току после ответвления $\underline{I}_\Phi^{\text{lab}} = \underline{I}_\Phi^{\text{lbc}}$.

Коэффициенты связи:

- $K_R = (2 \cdot 0,49 + 1,065) / 1,12 = 1,825;$

- $K_X = 2 + 4,02/1,12 = 5,589$;
- $K_{MR} = 0,57/1,12 = 0,51$;
- $K_{MX} = 2,56/1,12 = 2,586$;
- $K_{RI} = 0,49/1,12 = 0,438$;
- $X_{УД} = 1,12/2,779 = 0,403$.

Составляющие выражения (2.18):

- $\text{Re}(\Delta I_{\Phi}^{\text{lab}}) = \text{Re}(\Delta I_{\Phi}^{\text{lbc}}) = 0,336$;
- $\text{Im}(\Delta I_{\Phi}^{\text{lab}}) = \text{Im}(\Delta I_{\Phi}^{\text{lbc}}) = -0,579$;
- $r_{\Sigma} = 2 \cdot 1,55 + 3,34 = 6,44$;
- $x_{\Sigma} = 2 \cdot 3,51 + 12,61 = 19,63$;
- $\text{Re}(\Delta U_1) = 0,426 \cdot 6,44 - (-0,835) \cdot 19,63 + 0,125 \cdot 1,09 - (-0,313) \cdot 8,1 + 0,336 \cdot 1,55 - (-0,579) \cdot 3,51 = 24,36$;
- $\text{Im}(\Delta U_1) = 0,426 \cdot 19,63 + (-0,835) \cdot 6,44 + 0,125 \cdot 8,1 + (-0,313) \cdot 1,09 + 0,336 \cdot 3,51 + (-0,579) \cdot 1,55 = 3,948$;
- $\text{Re}(I_x) = 0,426 \cdot 1,826 - (-0,835) \cdot 5,589 + 0,125 \cdot 0,509 - (-0,313) \cdot 2,286 + 0,336 \cdot 0,4375 - (-0,579) = 6,95$;
- $\text{Im}(I_x) = 0,426 \cdot 5,589 + (-0,835) \cdot 1,826 + 0,125 \cdot 2,286 + (-0,313) \cdot 0,509 + 0,336 + (-0,579) \cdot 0,437 = 1,107$;
- $\text{ctg} \varphi_k = (0,426 + 0,125 + 0)/(-0,835 - 0,313 - 0) = -0,48$.

Предварительное расстояние до места повреждения:

$$L_{K3} = 9,784 + [30,49 - 24,36 + 3,948 \cdot (-0,48)] / [(6,95 - 1,07 \cdot (-0,48)) \cdot 0,403] = 11,19 \text{ км.}$$

Величина $11,19 \text{ км} < 12,563 \text{ км}$, следовательно место повреждения находится в пределах рассматриваемого участка линии.

Уточненный расчет. Последовательность уточненного расчета аналогична предварительному, за исключением того, что величина $\text{ctg} \varphi_k$ определяется по выражению (2.16), а ток нулевой последовательности I_0^{C2} от системы C2 по (3.22). Расчет произведем методом простой итерации, где в качестве начального приближения примем предварительное расстояние до места повреждения $L_{K3}^{(0)} = 11,19 \text{ км}$, а коэффициент демпфирования примем равным 0,5. Сходимость итерационного процесса будем проверять согласно выражениям (3.30) и

(3.31), для этого зададимся точностью равной $0,0001 \cdot L_{\text{лин}}$ и количеством итераций – 1000, т.е. $\epsilon = 0,0012$, а $i_{\text{max}} = 1000$.

1 итерация.

$i = 1$;

составляющие выражения (3.22):

$$\underline{Z}_{0l} = \underline{Z}_0^{ab} + \underline{Z}_0^{bc} \cdot \frac{L_{K3} - L_{ab}}{L_{bc}} = 3,34 + j12,61 + (1,065 + j4,02) \cdot [(11,19 - 9,784)/2,779] = 3,88 + j14,65 \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_{Ml} = \underline{Z}_M^{ab} + \underline{Z}_M^{bc} \cdot \frac{L_{K3} - L_{ab}}{L_{bc}} = 1,09 + j8,1 + (0,57 + j2,56) \cdot [(11,19 - 9,784)/2,779] = 1,66 + j10,66 \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_{0(L-l)} = \underline{Z}_0^{bc} - \underline{Z}_0^{bc} \cdot \frac{L_{K3} - L_{ab}}{L_{bc}} = (1,065 + j4,02) \cdot [1 - (11,19 - 9,784)/2,779] = 0,523 + j1,974 \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_0^{C2} = 0,331 + j4,73 \text{ Ом по состоянию системы на 21.03.00 14.39};$$

Ток нулевой последовательности от C2:

$$\underline{I}_0^{C2} = 1,213 - j 3,15;$$

Котангенс тока КЗ в месте повреждения с учетом тока \underline{I}_0^{C2} :

$$\text{ctg} \varphi_k = -0,41;$$

Уточненное расстояние до места повреждения:

$$L_{K3}^{(1)} = 11,30019 \text{ км};$$

Сходимость: $\epsilon_i = |11,19 - 11,30019| = 0,107 > \epsilon$; $i < i_{\text{max}}$. Так как условия сходимости не выполняются, переходим к следующей итерации с $L_{K3} = 11,3 - 0,5 \cdot (11,19 - 11,3) = 11,247 \text{ км}$.

км.

2 итерация.

$i = 2$;

$$\underline{I}_0^{C2} = 1,213 - j 3,2;$$

$$\text{ctg} \varphi_k = -0,409;$$

$$L_{K3}^{(2)} = 11,303 \text{ км};$$

Сходимость: $\epsilon_i = 0,0563 > \epsilon$; $i < i_{\text{max}}$; $L_{K3} = 11,275 \text{ км}$.

3 итерация.

$i = 3$;

$$I_0^{C2} = 1,235 - j 3,23;$$

$$\operatorname{ctg} \varphi_k = -0,408;$$

$$L_{K3}^{(3)} = 11,304 \text{ км};$$

Сходимость: $e_i = 0,0297 > e$; $i < i_{\max}$; $L_{K3} = 11,289 \text{ км}$.

4 итерация.

$$i = 4;$$

$$I_0^{C2} = 1,239 - j 3,246;$$

$$\operatorname{ctg} \varphi_k = -0,4075;$$

$$L_{K3}^{(4)} = 11,305 \text{ км};$$

Сходимость: $e_i = 0,0156 > e$; $i < i_{\max}$; $L_{K3} = 11,297 \text{ км}$.

5 итерация.

$$i = 5;$$

$$I_0^{C2} = 1,241 - j 3,254;$$

$$\operatorname{ctg} \varphi_k = -0,407;$$

$$L_{K3}^{(5)} = 11,305 \text{ км};$$

Сходимость: $e_i = 0,0083 > e$; $i < i_{\max}$; $L_{K3} = 11,3016 \text{ км}$.

6 итерация.

$$i = 6;$$

$$I_0^{C2} = 1,241 - j 3,259;$$

$$\operatorname{ctg} \varphi_k = -0,40706;$$

$$L_{K3}^{(6)} = 11,306 \text{ км};$$

Сходимость: $e_i = 0,0044 > e$; $i < i_{\max}$; $L_{K3} = 11,304 \text{ км}$.

7 итерация.

$$i = 7;$$

$$I_0^{C2} = 1,2425 - j 3,261;$$

$$\operatorname{ctg} \varphi_k = -0,4069;$$

$$L_{K3}^{(7)} = 11,3062 \text{ км};$$

Сходимость: $e_i = 0,00298 > e$; $i < i_{\max}$; $L_{K3} = 11,305 \text{ км}$.

8 итерация.

$$i = 8;$$

$$I_0^{C2} = 1,2428 - j 3,262;$$

$$\operatorname{ctg} \varphi_k = -0,4069;$$

$$L_{K3}^{(8)} = 11,3062 \text{ км};$$

Сходимость: $e_i = 0,00121 > e$; $i < i_{\max}$; $L_{K3} = 11,3056 \text{ км}$.

9 итерация.

$$i = 9;$$

$$I_0^{C2} = 1,243 - j 3,2628;$$

$$\operatorname{ctg} \varphi_k = -0,40692;$$

$$L_{K3}^{(9)} = 11,30625 \text{ км};$$

Сходимость: $e_i = 0,00064 > e$; $i < i_{\max}$;

На 9-й итерации выполняются условия сходимости итерационного процесса, следовательно, его можно закончить с уточненным расстоянием до места повреждения равным 11,3 км по состоянию системы на 21.03.00 14.39.

Определение расстояния до места повреждения по третьему этапу аварии не производим в связи с тем, что отключение одной из двух цепей двухцепной линии влияет на ее параметры. Вопрос определения места повреждения с отключенной одной цепью двухцепной линии рассмотрен в [110].

4.2.2 Повреждение ВЛ "И – С"

Согласно записи оперативного журнала 16.07.02 в 6:55 на ВЛ "И – С" имело место однофазное КЗ. Поврежденная фаза – фаза В. Причина отключения ВЛ – повреждение траверсы на опоре №2. Расстояние до места повреждения составило 0,15 км от ПС "И".

Описание поврежденной линии. Линия "И – С" связывает ПС "И" и ПС "С" и является одноцепной линией, имеющей магнитную связь на части трассы. Полная длина линии от ПС "И" до ПС "С" 5,3 км; расстояние от ПС "И" до ответвления на ПС "ПП" 2,33 км; длина ответвления 1 км; Начиная от ответвления на ПС "ПП" и до ПС "С" линия магнитосвязана с линией "ПП – С". Схема замещения линии показана на рис.4.6.

Нейтрали трансформаторов на ПС "ПП" замкнуты.

Полная осциллограмма аварийного отключения линии приведена на рис.4.7. В рассматриваемой записи аварийного отключения линии можно выделить два характерных этапа.

1 этап: однофазное КЗ на линии "И – С". Первый этап аварии заканчивается отключением линии "И – С". Характерной особенностью первого этапа аварии является подпитка места КЗ с двух сторон линии, со стороны ПС "И" и ПС "С".

2 этап: однофазное КЗ на линии "И – С" вследствие неуспешного АПВ. Второй этап заканчивается повторным отключением линии "И – С". Характерная особенность второго этапа аварии является также подпитка места КЗ с двух сторон линии.

Автоматический режим работы. Автоматически определено поврежденная линия – "И – С", вид КЗ – однофазное, поврежденная фаза – В и расчетный интервал ПАР, изображенный на рис.4.8. В результате этого режима работы было получено одно решения задачи определения расстояния до места повреждения – предварительное расстояние до места повреждения. Уточненное определение расстояния не проводилось из-за отсутствия в базе данных параметров системы С2. Предварительное расстояние составило величину 0,23 км (погрешность 1,5%).

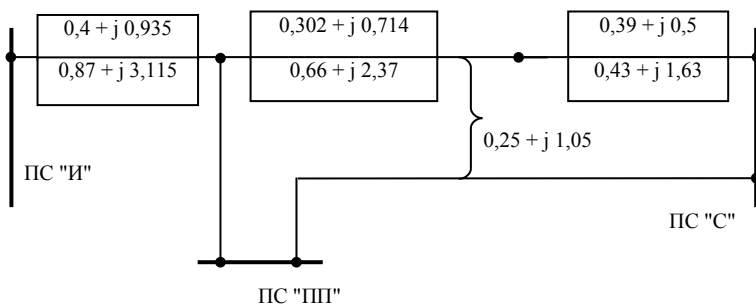


Рис.4.6 – Схема замещение линии "И – С"

Полуавтоматический режим работы. В полуавтоматическом режиме работы были рассмотрены первый и второй этапы аварии.

1 этап аварии. Длительность расчетного интервала ПАР 0,04 с, отступ от начального момента КЗ 0,08 с (рис.4.9). Предварительное расстояние до места повреждения составило величину 0,225 км (погрешность 1,4%).

2 этап аварии. Как видно из осциллограммы, ток поврежденной фазы в начале второго этапа аварии имеет явно выраженный несинусоидальный характер. С учетом этого обстоятельства расчетный интервал ПАР был выбран следующим образом. Отступ от начала второго этапа аварии – 0,08 с, длительность – 0,04 с (рис.4.9). Расстояние до места повреждения составило величину 0,217 км (погрешность 1,2%).

Информационный режим работы. В информационном режиме работы были рассмотрены первый и второй этапы аварийного отключения линии. Расчетные интервалы ПАР аналогичны выбранным в полуавтоматическом режиме работы. Результат работы информационного режима приведен в табл. 4.3 и 4.4 соответственно для первого и второго этапов аварии. Все параметры аварийного режима приведены относительно вектора напряжения поврежденной фазы, направленного по вещественной оси.

Следует отметить, что при определении расстояния до места повреждения рассматриваемой линии в случае ее повреждения на участке, связанном взаимоиндукцией с линией "ПП – С", будет иметь место дополнительная погрешность, обусловленная наличием дополнительной неизвестной величины – тока нулевой последовательности магнитосвязанной линии.

Таблица 4.3. Результат информационного режима по первому этапу аварийного отключения ВЛ "И – С".

	Фазные напряжения поврежденной линии			Фазные токи поврежденной линии		
	Ua	Ub	Uc	Ia	Ib	Ic
Действующее значение(кВ, кА)	65,09	5,89	58,91	0,6	14,01	0,54
Фаза (град)	139,1	0	251,04	116,8	- 59,44	124,69

Таблица 4.4. Результат информационного режима по второму этапу аварийного отключения ВЛ "И – С"

	Фазные напряжения поврежденной линии			Фазные токи поврежденной линии		
	Ua	Ub	Uc	Ia	Ib	Ic
Действующее значение(кВ,	65	5,87	68,16	0,63	13,93	0,53

кА)						
Фаза (град)	142,25	0	253,96	119,29	-62,23	119,29

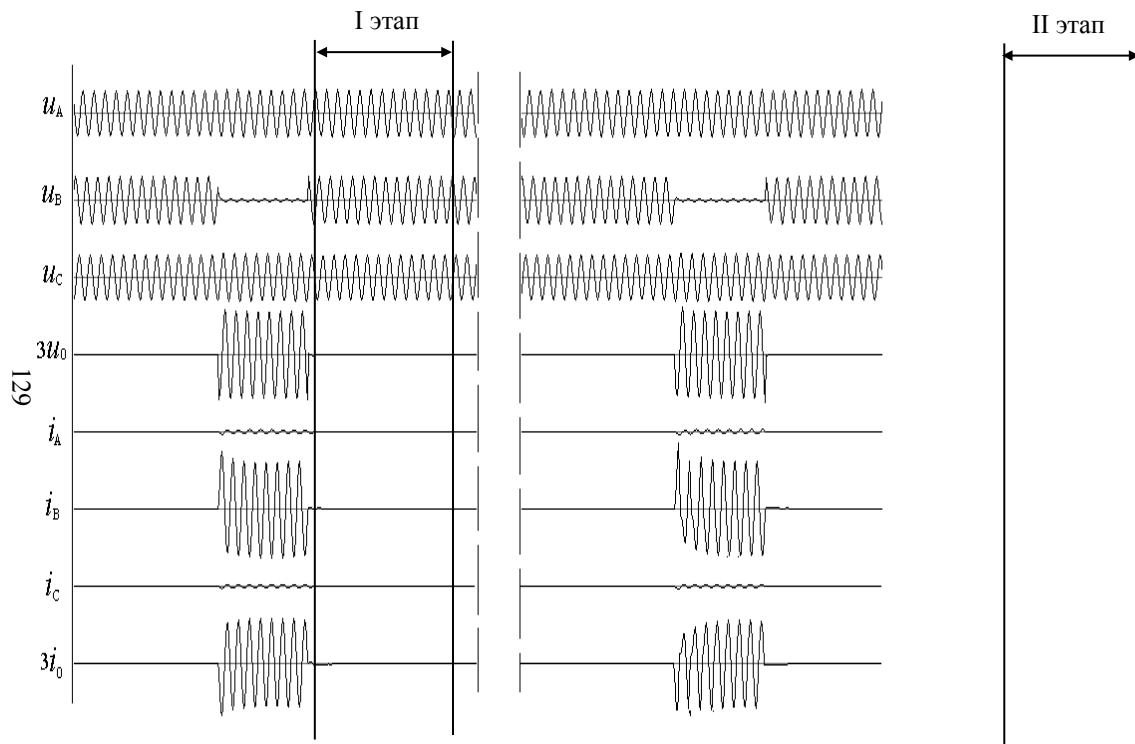


Рис.4.7 – Полная осциллограмма аварийного отключения ВЛ "И – С"

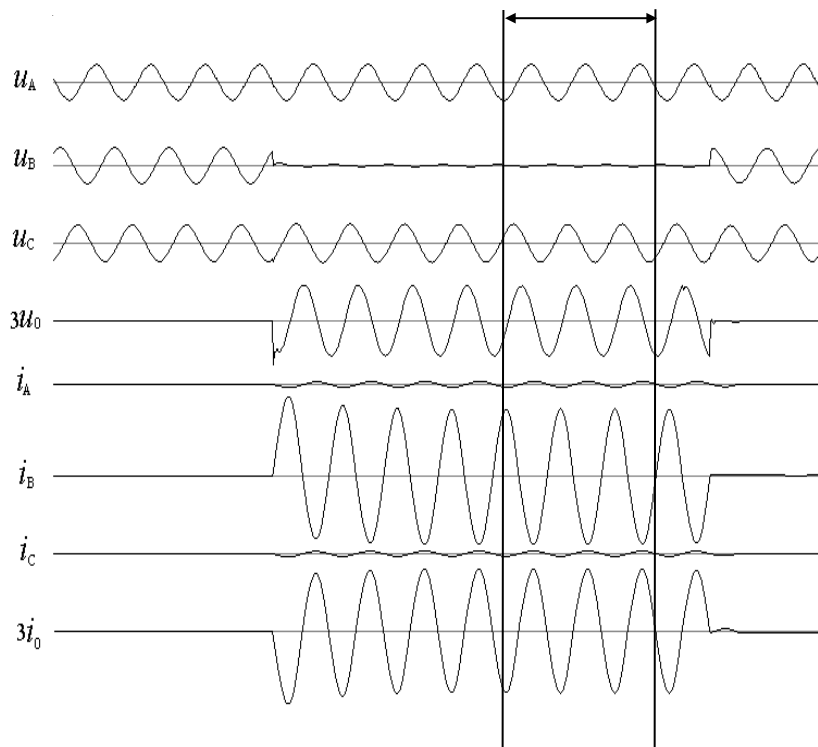


Рис.4.8 – Расчетный интервал ПАР автоматического режима работы при анализе записи аварийного отключения ВЛ "И – С"

Рис.4.9 – Расчетные интервалы ПАР полуавтоматического режима работы при анализе записи аварийного отключения ВЛ "И – С"

4.2.3 Повреждение ВЛ "К – Б"

Рассматриваемое повреждение зафиксировано программно – аппаратным комплексом "Рекон-60БС". Продолжительность записи аварийного отключения линии - 0,75 с, из которых первые 0,25 с приходятся на предаварийный режим. Частота регистрации мгновенных значений сигналов 1 кГц.

Согласно записи оперативного журнала 26.06.02 в 05:17 на ВЛ "К – Б" имело место однофазное КЗ. Поврежденная фаза – фаза С. Причина отключения ВЛ – повреждение траверсы на опоре № 63. Расстояние до места повреждения составило 11,6 км от ПС "К".

Линия "К – Б" связывает ПС "К" и ПС "Б" и является одноцепной линией. Полная длина линии от ПС "К" до ПС "Б" - 24,5 км. Схема замещения линии показана на рис.4.10.

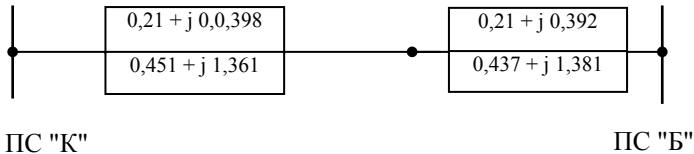


Рис.4.10 – Схема замещение линии "К – Б"

Полная осциллограмма аварийного отключения линии приведена на рис.4.11. В рассматриваемой записи аварийного отключения линии можно выделить только один характерный этап. Это однофазное короткое замыкание на линии "К – Б".

Автоматический режим работы. Автоматически определены поврежденная линия – "К – Б", вид КЗ – однофазное, поврежденная фаза – С и расчетный интервал ПАР, изображенный на рис.4.12. В результате этого режима работы было рассчитано только предварительное расстояние, которое составило величину 10,6 км (погрешность 4%).

Полуавтоматический режим работы. Длительность расчетного интервала ПАР 0,04 с, отступ от начального момента КЗ 0,09 с (рис.4.13). Предварительное расстояние до места повреждения составило величину 11,26 км (погрешность 1,5%).

Информационный режим работы. Расчетный интервал ПАР аналогичен выбранному в полуавтоматическом режиме работы. Результат работы информационного режима приведен в табл. 4.5. Все параметры аварийного режима приведены относительно вектора напряжения поврежденной фазы, направленного по вещественной оси.

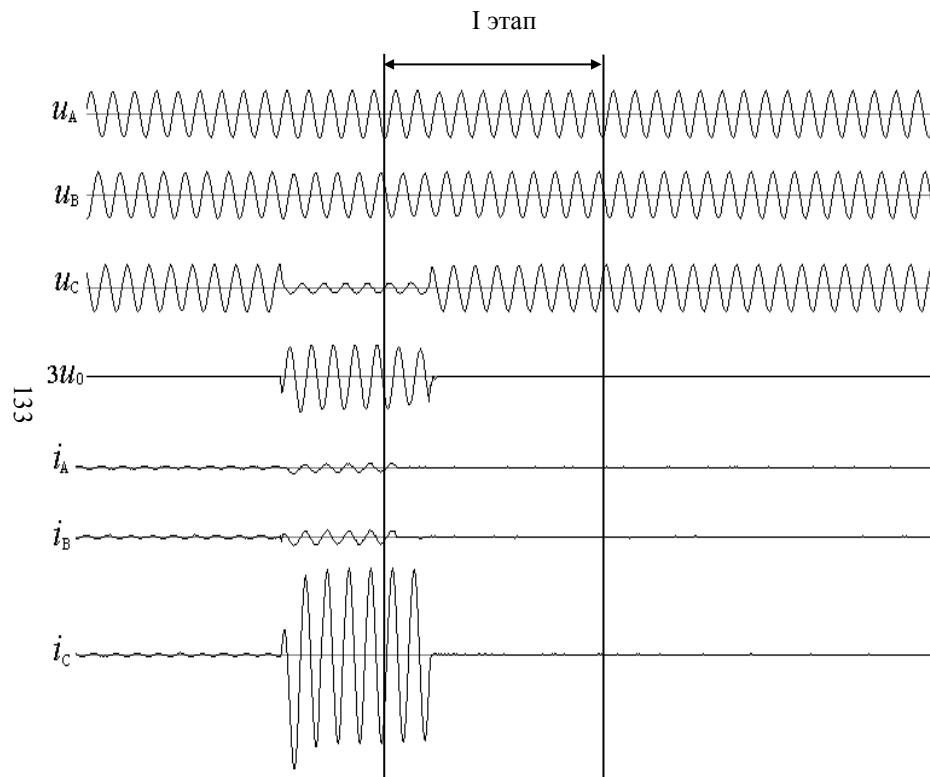


Рис.4.11 – Полная осциллограмма аварийного отключения ВЛ "К – Б"

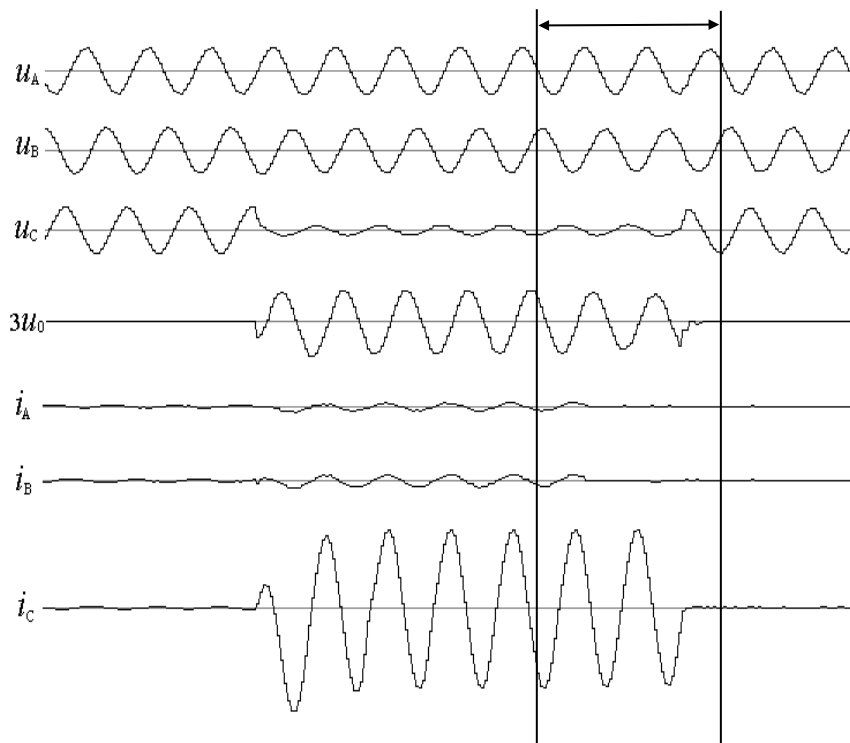


Рис.4.12 – Расчетный интервал ПАР автоматического режима работы при анализе записи аварийного отключения ВЛ "К – Б"

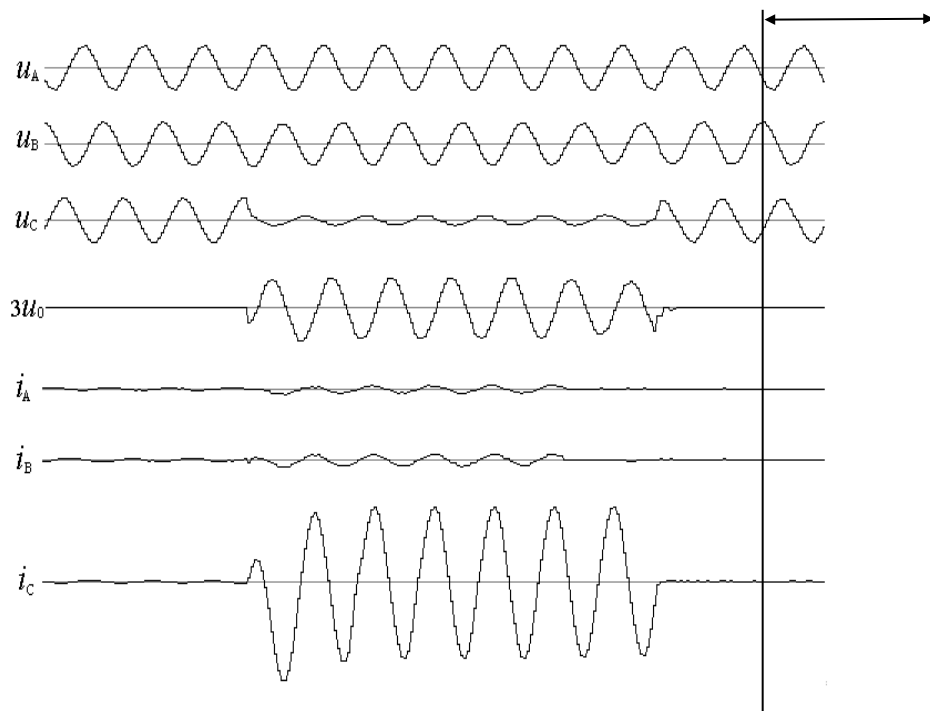


Рис.4.13 – Расчетный интервал ПАР полуавтоматического режима работы при анализе записи аварийного отключения ВЛ "К – Б"

Таблица 4.5. Результат информационного режима по первому этапу аварийного отключения ВЛ "К – Б"

	Фазные напряжения поврежденной линии			Фазные токи поврежденной линии		
	Ua	Ub	Uc	Ia	Ib	Ic
Действующее значение(кВ, кА)	64,54	60,26	17,22	0,068	0,11	1,42
Фаза (град)	-104,92	139,24	0	-34,38	-50,03	-46,79

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шалыт Г.М. Определение мест повреждения в электрических сетях. - М.: Энергоатомиздат, 1982. – 312 с.
2. Шалыт Г.М., Айзенфельд А.И., Малый А.С. Определение мест повреждений линий электропередачи по параметрам аварийного режима. / Под. Ред. Г.М. Шалыта. - М.: Энергоатомиздат, 1983.
3. Айзенфельд А.И., Шалыт Г.М. Определение мест короткого замыкания на линиях с ответвлениями. - М.: Энергия, 1988. – 160 с.
4. Аржанников Е.А. Дистанционный принцип в релейной защите и автоматике линий при замыканиях на землю. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 176с.
5. Малый и др. Определение мест повреждения линий электропередачи по параметрам аварийного режима. Под. ред. Г.М. Шалыта. – М.: Энергия, 1972. 216 с.
6. Шалыт Г.М. Определение мест повреждения линий электропередачи импульсными методами. - М.: Энергия, 1968.-216 с.
7. Stringfield T W, Marihart D J and Stevens R F, August 1957, "Fault Location Methods for Overhead Lines", AIEE Transactions, Part III, Vol. 76, 518-530.
8. Schweitzer III, E O, October 1982, "Evaluation and Development of Transmission Line Fault Locating Techniques Which Use Sinusoidal Steady-State Information", Proceedings of the 9th Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA.
9. Takagi T, Yamakoshi Y, Yamaura M, Kondou R and Matsushima T, August 1982, "Development of a New Type Fault Locator Using the One-Terminal Voltage and Current Data", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, No. 8, 2892-2898.
10. Schweitzer III, E O, October 1988, "A Review of Impedance-Based Fault Locating Experience", Proceedings of the 15th Annual Western Protective Relay Conference, Spokane, WA.
11. Eriksson L, Saha M M and Rockefeller G D, February 1985, "An Accurate Locator with Compensation for Apparent Reactance in the Fault Resistance Resulting from Remote-End Infeed", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104, No. 2, 424-436.
12. Cook V, September 1986, "Fundamental Aspects of Fault Location Algorithms Used in Distance Protection", IEEE Proceedings, Vol. 133, Pt. C, No. 6, 359-368.
13. Sachdev M S, Agarwal R, January 1988, "A Technique for Estimating Transmission Line Fault Locations from Digital Impedance Relay

- Measurements”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 3, No.1, 121-129.
14. Novosel D, Hart D G, Udren E and Garity J, January 1996, “Unsynchroized Two-Terminal Fault Location Estimate”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 1, 130-138.
 15. Gigris A A, Hart D G and Peterson W L, January 1992, “A New Fault Location Technique for Two- and Three-Terminal Lines”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 7, No. 1, 98-107.
 16. Abe M, Otsuzuki N, Emura T and Takeuchi M, January 1995, “Development of a New Fault Location System for Multi-Terminal Single Transmission Lines”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 10, No. 1, 159-168.
 17. Advancements in Microprocessor Based Protection and Communication, 1997, Sachdev M S (Coordinator), IEEE Tutorial Course, Publication No. 97TP120-0, 63-72.
 18. Mao Weimin, Lu Defeng, Xiao Xiang, The application and research of a novel and practical fault location Algorithm using samples from double ended Automation devices of Electric Power Systems.2000,20(2):26-28.
 19. Chen zheng, Su Jinxi, Wu Xinrong, etc. Algorithm for high voltage transmission line fault location based on distributed parameter Power Systems Technology, 2000, 24(11):31-33.
 20. Liang Jun ,Zhao Yong, Che Renfei, etc A accurate fault location Algorithm based on double ended sampled data. Automation of Electric Power Systems, 1997,21(9):24-27.
 21. Shu hongcun, Si Dajun, Ge Yaozhong, etc, Apractical fault location Algorithm and its realization based on unsynchronized double ended sampled data. Power Systems Technology, 2000,24(2):45-49.
 22. Su Jinxi, Luo Chengmu, Xie Zifeng, etc.A practical fault location Algorithm based on double ended sampled data Journal of Tsinghua University, 2000,40(7):27-30.
 23. Половников В.А., Бунин В.А., Кофман Б.Л Малогабаритный испытатель кабелей и линий П5-5.- Энергетик, 1968, №11, с. 13-15.
 24. Прибор для определения места повреждения кабелей П5-9/ В.А Половников, В.Н. Милованов, Б.Л. Кофман, Г.М. Шалыт. – Электрические станции. – 1976. - №2, - С. 86-88.
 25. Устройство для определения мест сложных повреждений кабельных линий/ Л.И. Брауде, В.П. Коваленко, С.Н. Окнин, Г.М. Шалыт// Электрические станции. – 1975. - №11. - С.77-79.
 26. Локационный автоматический искатель повреждений ВЛ П5-7/ Г.М. Шалыт, С.Е. Сидорчук, А.Н. Афонин, А.Я. Красюк// Опреде-

- ление мест повреждения воздушных линий электропередачи. -М.: Энергия, 1977. - С. 131-139.
27. Приборы для определения места повреждения подвесных линий электропередачи. – Дэнки кейсан, 1963, т.31, №7, с. 36.
 28. Fujutaka S., Udo T. The present situation of the transmission line fault locators in Japan, 1962.
 29. Hara M. Fault locating means for electric power transmission line. United States Patent Office, 1965, October 12.
 30. Jamiesson E. Automatic fault location on overhead transmission lines/ Electrical Review, 1969. Vol. 185, №23.
 31. Frequency-modulated fault locator for power lines / D. R. Stevens, G. E. Ott, W. C. Pomeroy, J. R. Tudor//IEEE Transactions. 1972. Vol. Pas-91, №5.
 32. Pithes B.M., M. Gowon P. J. Fault Location using the line overload indicator. – Indian J. Power L. River. Val. Dev., 1973, vol.23, №2, p. 59-61.
 33. Айзенфельд А.И. Аронсон В.Н., Гловацкий В.Г. Фиксирующий индикатор сопротивления ФИС.-М.: Энергоатомиздат, 1987.-64 с.
 34. Борухман В. А., Кудрявцев А. А., Кузнецов А. П. Устройства для определения мест повреждения на воздушных линиях электропередачи 6-750 кВ.- М.: Энергия, 1980. - 104 с.
 35. Айзенфельд А. И., Кудрявцев А. А. Эксплуатация фиксирующих приборов для определения места замыкания на линиях 110—500 кВ. // Электрические станции. – 1968. - № 12. - С. 53-55.
 36. Айзенфельд А. И., Кудрявцев А. А., Розенкноп М. П. Определение места замыкания на линиях 110 кВ и выше с помощью фиксирующих приборов – Энергетик. – 1969. - № 2. - С. 12-14.
 37. Айзенфельд А. И., Кудрявцев А. А. Применение фиксирующих приборов для определения мест повреждения воздушных линий 110-500 кВ. -М.: Информэнерго, 1972.- 39 с.
 38. Малый А. С., Розенкноп М. П. Фиксирующие приборы типа Ф-Э34. - Электрические станции. – 1963. - № 7. - С. 60-62.
 39. Виноградов Н. В. Устройства для определения мест повреждения на линиях электропередачи / Информационное сообщение Э-1261. -М.: БТИ ОРГРЭС, 1961.-29 с.
 40. Булитко А. Д., Дерюгин Ф. Ф., Заричная А. Н. Устройства для определения вероятного места повреждения на линии электропередачи// - Электрические станции. – 1962. - № 5. - С. 48-50.
 41. Елфимов В. М. Определение места повреждения на линиях электропередачи// Электрические станции. – 1962. - № 5. - С. 51, 52.

42. Кайзер Ю. П. Устройство для определения места повреждения на линиях электропередачи// Экспериментально-конструкторские работы ЦЛЭМ Тулаэнерго. - Тула: Изд. Тульского областного правления научно-технического совета электропромышленности, 1963, с. 63.
43. Федоров Ф. Д. Устройство для определения места замыкания на линиях электропередачи// Опыт эксплуатации электрохозяйства Ленэнерго. - М.: Энергия, 1964, с. 56-59.
44. Висяшев А. Н. Фиксирующие приборы для определения места повреждения на воздушных линиях электропередачи// Опыт эксплуатации релейной защиты и электроавтоматики в энергосистемах. 1970. Вып. 2.- С. 87-91.
45. Петров А. А. Прибор для определения короткого замыкания на линии электропередачи (УОМП-1). Устройство для определения места повреждения в линии электропередачи с использованием магнитной памяти// Тр. Саратовского института механизации сельского хозяйства имени М. И. Калинина, 1967. Вып. 39. Ч. II. -С. 38-41.
46. Баранаускас Л. П. Применение фиксирующих приборов на ВЛ. – Энергетик. – 1971. - № 9. - С. 17-19.
47. А. с. 248080 (СССР). Фиксирующий измерительный прибор / П. И. Горюнов, А. Ф. Божко. Оpubл. в Б. П., 1969, № 23.
48. А. с. 153334 (СССР). Устройство для регистрации аварий в электрических сетях / П. И. Горюнов, И. Л. Долинский. Оpubл. в Б. И., 1963, № 5.
49. Хейфец С. И. Фиксирующий прибор с магнитной памятью// Электрические станции. – 1963. - № 8. - С. 62-64.
50. Мельников Г. Д., Сокол И. А. Фиксирующий прибор с магнитным запоминанием.- Электрические станции, 1963, № 8, с. 61,62.
51. Биркенфелдс Э. Я., Янаус А. Я. Фиксирующие приборы для определения места короткого замыкания// Электрические станции. -1973. - № 5. - С. 46-49.
52. А. с. 363156 (СССР). Устройство для питания / Э Я. Биркенфелдс, А. Я. Янаус. Оpubл. в Б. И., 1973, № 3.
53. А. с. 407413" (СССР). / Э. Я. Биркенфелдс, А. Я. Янаус. Оpubл. в Б. И., 1973, № 46.
54. А. с. 385228 (СССР). Цифровой фиксирующий прибор для измерения электрических величин / А. П. Кузнецов, Э. Я. Биркенфелдс, А. Я. Янаус. Оpubл. в Б. И., 1973, № 25.

55. А. с. 319992 (СССР). Устройство для фиксации электрических величин / Э. Я. Биркенфелдс, А. Я. Янаус, Е. И. Окунцов. Оpubл. в Б. И., 1971, № 33.
56. А. с. 353205 (СССР). Устройство для фиксации электрических величин / А. А. Кудрявцев, А. П. Кузнецов, Э. Я. Биркенфелдс и др. Оpubл. в Б. И., 1972, № 29.
57. А. с. 420967 (СССР). Устройство для фиксации электрических величин / А. А. Кудрявцев, А. П. Кузнецов, Э. Я. Биркенфелдс и др. Оpubл. в Б. И., 1974, № 11.
58. А. с. 479058 (СССР). Устройство для непосредственного определения расстояния до места короткого замыкания на линии с ответвлениями / А. И. Айзенфельд, А. А. Кудрявцев, А. П. Кузнецов и др. Оpubл. в Б. И., 1975, № 28.
59. Берхин В. И., Кондратюк С. Ф. Определение мест междуфазных к. з. в воздушных распределительных сетях// Энергетик. – 1974. - № 11. - С. 33-34.
60. Айзенфельд А. И., Кузнецов А. П. Применение фиксирующих приборов с фильтрами обратной последовательности для определения мест повреждения на линиях электропередачи// Энергетик. – 1972. - № 3. - С. 24-25.
61. А. с. 294164 (СССР). Устройство для телеизмерения А. И. Айзенфельд, В. Е. Казанский, А. А. Кудрявцев, А. П. Кузнецов. Оpubл. в Б. И., 1971, № 6.
62. Айзенфельд А. И., Кудрявцев А. А. О необходимости повышения эффективности методов и фиксирующих приборов для определения мест повреждения воздушных линий// Электрические станции. – 1976. - № 3. - С. 67-69.
63. Разработка и внедрение цифрового измерителя параметров работы электрических сетей: Отчет о научно-исследовательской работе/. Национальная академия наук Украины, северо-восточный научный центр; № ГР 0199U001147.- Харьков, 2001. - 148 с.
64. Техническое описание «Рекон 06БС».
65. Техническое описание «Регина».
66. Техническое описание «Нева».
67. Техническое описание «Парма РП 4.06», «Парма РП 4.08».
68. Техническое описание «Oscillostore P 531», «Oscillostore E 410».
69. Техническое описание “Диамант”.
70. Айзенфельд А.И. Результаты внедрения и эксплуатации фиксирующих приборов для определения мест повреждения ВЛ 110-750 кВ // Электрические станции.-1992.-№6.-С.44-46.

71. Методические указания по определению мест повреждения воздушных линий напряжением 110 кВ и выше с помощью фиксирующих приборов: РД 34.35.517-89: Утв. Гл. техн. Упр. Энергетики и электрификации 27.12.88. – М.: СПО Союзтехэнерго, 1989. – 96 с.
72. Костенко М.В., Перельман Л.С., Шкарин Ю.П. Волновые процессы и электрические помехи в многопроводных линиях высокого напряжения. – М.: Энергия, 1973. – 272 с.
73. Алексеев В.Г. Расчет формы сигнала. – Л.: Энергия, 1968. – 296с.
74. Захар-Иткин М.Х. О модах затухания активной мощности в многопроводной линии электропередачи// Теоретическая электротехника/. – Львов: Львовский гос. ун-т 1977. - №2. - С. 79-85.
75. Шалыт Г.М. Расчет распространения импульсов по однородной многопроводной линии электропередачи// Тр. ВНИИЭ, 1973. Вып. 43. - С. 25-34.
76. Микуций Г.В., Скитальцев В.С. Высокочастотная связь по линиям электропередачи. – М.: Энергия, 1969. - 448 с.
77. Быховский Я.Л., Кафиев К.Я. Высокочастотная связь в энергосистемах. - М.: Энергия, 1974. – 152 с.
78. Микуций Г.В. Каналы высокочастотной связи для релейной защиты и автоматики. М.: Энергия, 1977. – 312 с.
79. Шкарин Ю.П. Приближенное определение параметров волновых каналов трехпроводных ВЛ 35-500 кВ с унифицированными опорами. – В кн.: Вопросы эксплуатации устройств связи и телемеханики в энергосистемах. - М. Энергия, 1970. Вып. 10. - С. 288 - 312.
80. Котельников В.А. Теория потенциальной помехоустойчивости. М.: Госэнергоиздат, 1956. 151 с.
81. Вудворд Ф.М. Теория вероятности и теория информации с применением в радиолокации. – М.: Советское радио, 1955. – 127 с.
82. Гуткин Л.С. Теория оптимальных методов радиоприема при флуктуационных помехах. – М.: Советское радио, 1972, - 448 с.
83. Измерения расстояний до мест повреждений на воздушных и кабельных линиях электропередачи и связи/ В.Л. Бакинский, А.П. Осадчий, Н.И. Сосфенов, В.К. Спиридонов. – ЦНИЭЛ, 1954. Вып. 145, с. 81-99.
84. Маранчак В.М., Новелла В.Н. Об одном методе измерения расстояния до места повреждения на ЛЭП постоянного тока // Релейная защита и автоматизация энергосистем. ТР. МЭИ. 1972. Вып. 145. - С. 122 – 130.

85. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. - М.: Высшая школа, 1970.
86. Зелях Э.В. Основы общей теории линейных электрических схем. - М.: Изд-во АН СССР, 1951.
87. Гантмахер Ф.Р. Теория матриц. - М.: Наука, 1967.
88. Повышение надежности и точности отыскания места повреждения воздушных линий электропередачи фиксирующими приборами// Тр. ВНИИЭ. - М.: Энергия, 1976. Вып. 27. - С. 173 - 176.
89. Шур Ю.Б., Висящев А.Н. Определение места замыкания на землю по составляющим повреждения на линиях электропередачи. - М.: Энергия, 1964.
90. Малый А.С. Определение места замыкания по измерениям с одного конца линии электропередачи // Определение мест повреждения воздушных и кабельных линий электропередачи. - М.: Энергия, 1966.
91. Способ определения места однополюсного короткого замыкания линии электропередачи: А.с. 315133 СССР, МКИ G01R 31/08. / Шалыт Г.М. (СССР). - № 1441911/24-7; Заявлено 22.05.70; Оpubл. 21.09.71, Бюл. № 28.
92. Способ определения расстояния до места однофазного короткого замыкания и устройство для его осуществления: А.с. 1661687 СССР, МКИ G01R 31/08. / Айзенфельд А.И., Шабанов В.А., Федотов И.А., Аронсон В.Н. (СССР). - № 4081336/21; Заявлено 27.06.86; Оpubл. 07.07.91, Бюл. № 25.
93. Способ одностороннего определения расстояния до места однофазного короткого замыкания на линиях с ответвлениями и устройство для его реализации: А.с. 1721554 СССР, МКИ G01R 31/08. / А.-С.С. Саухатас, А.Г. Капустин, Э.Ю. Гяджюс (СССР). - № 4384360/21; Заявлено 11.01.88; Оpubл. 23.03.92, Бюл. № 11.
94. Способ определения мест повреждения воздушных линий электропередачи: А.с. 1721555 СССР, МКИ G01R 31/08. Айзенфельд А.И., Саухатас А.-С.С., Аронсон В.Н. (СССР). - № 4695146/21; Заявлено 22.05.89; Оpubл. 23.03.92, Бюл. № 11.
95. Способ одностороннего определения расстояния до места короткого замыкания на линиях с ответвлениями и устройство для его осуществления: А.с. 1767455 СССР, МКИ G01R 31/08. Саухатас А.-С.С., Капустин А.Г., Айзенфельд А.И. (СССР). - № 4608879/21; Заявлено 24.11.88; Оpubл. 07.10.92, Бюл. № 37.
96. Способ одностороннего определения расстояния до места однофазного короткого замыкания: А.с. 1742752 СССР, МКИ G01R

- 31/08. Саухатас А.-С.С., Ванзович Э.П., Клявиньш Г.А. (СССР). - № 4817725/21; Заявлено 14.02.90; Оpubл. 23.06.92, Бюл. № 23.
97. Пат. 2033622 RU, МКИ G 01 R 31/11, Н 02 Н 3/28. Способ определения места и характера повреждения линии электропередачи с использованием ее модели./ Лямец Ю.А., Антонов В.И., Ефремов В.А., Нудельман Г.С., Подшивалин Н.В. (Россия); № 4685872/63; Заявл. 03.05.89; Оpubл. 20.04.95 Бюл. № 11.
98. Пат. 2107304 RU, МКИ G 01 R 31/08. Способ определения места повреждения линии электропередачи с двухсторонним питанием. Ильин В.А., Лямец Ю.А. (Россия); № 95119532/09; Заявл. 13.11.95; Оpubл. 20.03.98
99. Пат. 2116654 RU, МКИ G 01 R 31/08. Способ определения места повреждения линии электропередачи с односторонним питанием (варианты) Ильин В.А., Лямец Ю.А., Подшивалин Н.В., Ефремов В.А., Арсентьев А.П. (Россия); № 95117914/09; Заявл. 23.10.95; Оpubл. 27.07.98.
100. Декснис Р.-П. Исследование способов и средств определения расстояния до места повреждения линий электропередач по параметрам аварийного режима// Автореф. дис. Каунасский политехн. и-т., 1975. – 24 с.
101. Пат. 1532591 Франция. Compaque des compteurs / G/ Cahen, H/ Guyard, M Sauillard // Промышленная собственность. 1968. №28.
102. Пат. № 3474333 США. Line fault locator in electrical system/
103. Бургсдорф В.В. Открытие дуги большой мощности // Электричество. – 1948. - № 10. - С. 15-23.
104. Руководящие указания по релейной защите. Расчеты токов короткого замыкания для релейной защиты и системной автоматики в сетях 110-750 кВ. – М.: Энергия, 1979. - 152 с.
105. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. – М.: Энергия, 1970. - 520 с.
106. Смирнов В.И. Курс высшей математики. – М.: Наука, 1965. – Т.1. - 480 с.
107. Айзенфельд А. И. Учет сопротивления нулевой последовательности силовых трансформаторов при определении мест повреждения ВЛ // Электрические станции. – 1976. - № 1. - С. 63-66.
108. Боглаев Ю.П. Вычислительная математика и программирование. Учебное пособие для студентов втузов. - М.: Высшая школа, 1990. - 544 с.
109. Проектирование электрической части станций и подстанций: Учебн. Пособие для вузов / Ю.Б. Гук, В.В. Кантов, С.С. Петрова. - Л.: Энергоатомиздат. 1985. - 312 с.

110. Айзенфельд А. И. Влияние заземления одной из параллельных ВЛ на методику определения места повреждения // Электрические станции. – 1975. № 11. С. 58-59.
111. Беляков Ю.С., Пьянков В.Я. Итерационный метод расчета места повреждения ВЛ // Электрические станции.-1985.-№3.-С.54-57.
112. Айзенфельд А.И. Эффективность определения мест повреждения ВЛ 110-750 кВ и пути ее повышения // Электрические станции.-1986.-№4.-С.48-50.
113. Шабад М.А. Научно - технический семинар по дистанционному определению мест повреждения на ВЛ // Энергетик.-1995.-№6.-С.29
114. Белотелов А.К., Саухатас А.-С.С., Иванов И.А., Любарский Д.Р. Алгоритмы функционирования и опыт эксплуатации микропроцессорных устройств определения мест повреждения линий электропередачи // Электрические станции.- 1997.-№12.-С.7-12.
115. Молодцов В.С., Середин М.М., Щербинин А.И., Александров В.Н. О точности определения места повреждения на воздушных линиях электропередачи // Электрические станции.-1997.-№1.-С. 47-50.
116. Айзенфельд А.И. Алгоритмические погрешности определения мест повреждения воздушных линий напряжением 110-750кВ // Электрические станции.-1998.-№7.-С.60-63.
117. Аржанникова А.Е., Аржанников Е.А., Марков М.Г., Чухин А.М. Совершенствование приборов одностороннего определения места повреждения на ВЛ // Электрические станции.-1998.-№3.-С.43-46.
118. Апанасов В.В., Баланцев А.Р., Баланцев Г.А., Надеин В.Ф. О повышении надежности определения мест повреждения на ВЛ 110-220 кВ и рациональном размещении фиксирующих приборов// Электрические станции.-2001.-№11.-С.41-44.
119. Дунаев А.И. Об уточнении места повреждения на ВЛ с изолирующими распорками в расщепленных фазах // Электрические станции.-2001.-№11.-С.44-47.
120. Мисриханов М.Ш., Попов В. А., Якимчук Н.Н., Медов Р.В. Уточнение определения мест повреждения на ВЛ при использовании фазных составляющих// Электрические станции.-2001.-№3.-С.36-40.
121. Дунаев А.И. О новой технологии определения места повреждения на ВЛ// Энергетик.-2001.-№2.-С.17-20.
122. Цветков В.Я. Геоинформационные системы и технологии. - М.: Финансы и статистика, 1998, - 288 с.
123. Моделирование нашего мира. Copyright © 2001 Enviromental Systems Research Institute, Inc.
124. ArcGIS Electric Distribution Model. Copyright © 2001 Enviromental Systems Research Institute, Inc. and Miner and Miner.

Учебное издание

О.Г. Гриб, А.А. Светелик, Г.А. Сендерович, Д.Н. Калюжный.

**Автоматизированные методы и средства определения мест
повреждения линий электропередачи**

Учебное пособие

Ответственный за выпуск О.Г. Гриб

Редактор Н.З. Алябьев

Корректор З.И. Зайцева

План 2003, поз.32

Подп. к печати 17.09.03 Формат 60х84¹/₁₆.

Бумага офисная. Печать на ризографе. 12,0 уч. – изд.л.10,6 усл.-печ.л.

Тираж 500 экз. Зак.№ Цена договорная

ХГАГХ, 61002, Харьков, ул. Революции, 12.

Сектор оперативной полиграфии при ВЦ ХГАГХ.

61002, Харьков, ул. Революции, 12.